



# ماهنامه فناوری فوتونیک و مواد پیشرفته

ریاست جمهوری

سال دوم. شماره ۱۷. اسفند ۱۴۰۰

معاونت علمی و فناوری

ستاد توسعه فناوری فوتونیک، لیزر

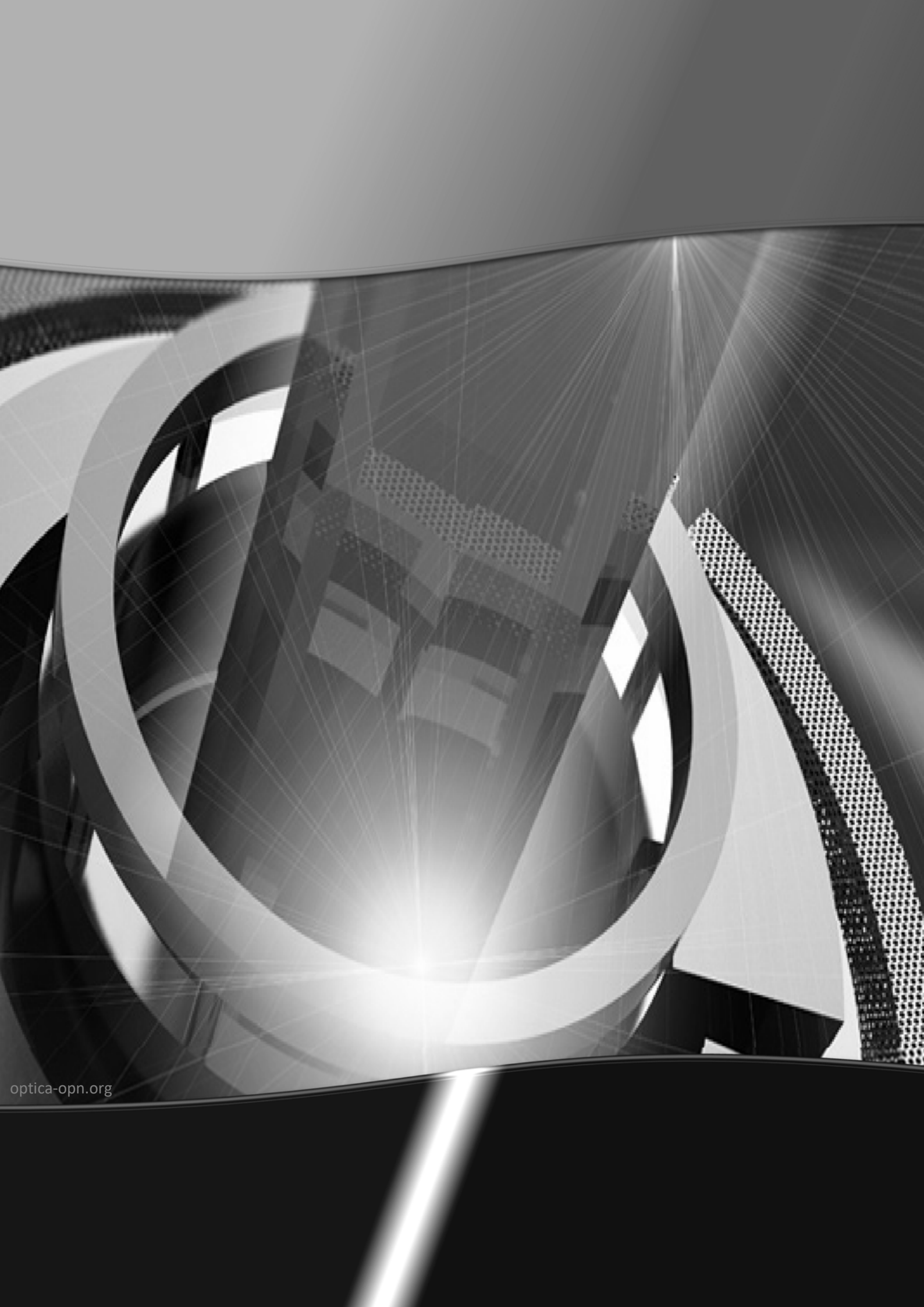
مواد پیشرفته و ساخت

مشاهده مستقیم  
درهم‌تنیدگی  
ماکروسکوپیکی

لیزرهای  
آبشاری  
کوانتومی

ارمغان فوتونیک  
برای  
خودروهای امروزی

درمان زخم‌های  
دیابت با تابش  
پلاسمای سرد





---

به نام خداوند بخشنده و مهربان

---

نشریه فناوری فوتونیک و مواد پیشرفته





ریاست جمهوری  
معاونت علمی و فناوری  
ستاد توسعه فناوری  
فوتونیک، لیزر، مواد پیشرفته و ساخت



پژوهشکده علوم کاربردی  
دانشگاه خوارزمی

### نشریه فناوری فوتونیک و مواد پیشرفته

صاحب امتیاز: ستاد توسعه فناوری فوتونیک، لیزر، مواد پیشرفته و ساخت

مدیر مسئول و سردبیر: محمدحسین مجلس آرا

جانشین سردبیر: بابک عفاقی

ویراستار و ناظر علمی: سیده ثریا موسوی

تحریریه: مریم بهروان، علی کاظم پور، سید مرتضی احمدی

سیده ثریا موسوی، بابک عفاقی

گروه مشاورین: سیامک میرزازاده، مریم بهرامی کهیش نژاد

سید حسین نکومنش فرد، سید محمد قریشی

پشتیبانی: کیومرث مهدی نیا گتابی

تارنما: [asrc.khu.ac.ir](http://asrc.khu.ac.ir) ; [pam.isti.ir](http://pam.isti.ir)

کانال نشریه: [t.me/PAM\\_Tech](https://t.me/PAM_Tech)

صفحه اینستاگرام: [https://instagram.com/pam\\_tech](https://instagram.com/pam_tech)

صفحه کانال آپارات: [https://www.aparat.com/PAM\\_Tech](https://www.aparat.com/PAM_Tech)

پست الکترونیک سردبیر: [deputy@pam.isti.ir](mailto:deputy@pam.isti.ir)

پست الکترونیک جانشین سردبیر: [babak.efafi@gmail.com](mailto:babak.efafi@gmail.com)

تلفن: ۰۲۱۲۲۱۸۳۱۱۳

نشانی: تهران، خیابان زعفرانیه، خیابان شهید سرلشکر فلاحی، کوچه شیرکوه، پلاک ۱۱،

ساختمان شماره دو معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری

### سخن سردبیر

گروه تحریریه ماهنامه فناوری فوتونیک و مواد پیشرفته در سالی که گذشت کوشید تا جدیدترین فناوری‌های مورد استفاده در حوزه فوتونیک و مواد پیشرفته را متناظر با سیاست‌های ستاد توسعه فناوری فوتونیک، لیزر، مواد پیشرفته و ساخت-معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری، معرفی نماید. به همین منظور در یازده شماره سال ۱۴۰۰ موضوعات مشخصی را مورد بحث قرار دادیم و به تجزیه و تحلیل فناوری‌های مرتبط با هر موضوع در داخل و خارج از کشور پرداختیم تا بتوانیم توانمندی‌های داخل کشور را جهت دستیابی به فناوری‌های روز دنیا بررسی نماییم. در شماره آخر سال ۱۴۰۰ می‌کوشیم تا برترین فناوری‌های یک سال اخیر را که بیشترین حجم بازار مالی محصولات فناوری حوزه فوتونیک و مواد پیشرفته هم به خود اختصاص داده‌اند، برای مخاطبان این ماهنامه دسته‌بندی و معرفی نماییم و همچنین متناظر با محصولات برتر بازار جهانی، توانمندی و محصولات داخل کشور را که در حوزه برترین فناوری‌های یک سال اخیر بوده‌اند، مورد بحث قرار دهیم. حوزه‌های مرتبط با کاربردهای بیولوژیکی پلاسما، نمایشگرهای پارچه‌ای، ریز شناساگرهای دارو رسان و ساخت مواد دو بعدی ویژه بخشی از مباحث حوزه اخبار فناوری را در ۳ حوزه اخبار داخلی، خارجی و علمی، تشکیل می‌دهند. در بخش دورنما بحث مفصلی در ارتباط با آینده شگفتی آفرین حوزه فوتونیک که منجر به انقلاب صنعتی چهارم می‌شود، خواهیم داشت. در قالب آموزش کاربردی، تلاش می‌کنیم تا مفاهیم مرتبط با نور فشرده را برای آشنایی مخاطبان با این حوزه ارائه نماییم. توانمندی‌های شرکت‌های دانش‌بنیان آرمان جستجوگران انرژی نور و فتح نور میهن را در بخش علم تا ثروت بررسی می‌نماییم. بخش نوآورانه به معرفی نوآوری‌های مرتبط با لیزرهای آبشاری کوانتومی به عنوان یکی از ۷ ترند فناوری سال ۲۰۲۱، اختصاص دارد و در بخش پایانی یعنی دروازه‌های علم، جدیدترین مقالات مرتبط با لیزرهای کاواک عمودی و درهم‌تنیدگی کوانتومی را به عنوان پرتفردارترین فناوری‌های یک سال اخیر، مورد بحث قرار می‌دهیم. در این راستا نشریه فناوری فوتونیک و مواد پیشرفته، بر خود لازم می‌داند گامی هرچند کوچک در راستای معرفی و توسعه فناوری‌های برتر یک سال اخیر جهان بردارد و زیرساخت‌ها و امکانات موجود در داخل کشور را با هدف ارتقا کیفیت محصولات حوزه فناوری‌های فوتونیک و مواد پیشرفته، مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. امید است با تلاش هرچه بیشتر صنعت‌گران و افزایش دانش فنی تولیدکنندگان از پیشرفت‌های اخیر این حوزه، محصولاتی با کیفیت مطابق با آخرین استانداردهای جهانی، شایسته اعتماد ستودنی هم‌میهنان عزیزمان تولید شود که به این ترتیب بتوانیم همگام با کشورهای پیشرفته دنیا به بهره‌وری حداکثری در زمینه ساخت محصولات مرتبط با این حوزه دست‌یابیم و سهم قابل توجهی از بازار گسترده جهانی این محصولات را به دست آوریم.



## اخبار فناوری

### اخبار فناوری داخلی

درمان زخم‌های دیابت با تابش پلاسمای سرد، توسط محققان ایرانی تراشه زیستی ایران‌ساخت، جهت شناسایی سموم غذایی تولید مکمل سوخت هیبریدی برای نجات هوای پاک آندوسکوپ انعطاف‌پذیر، در زمره محصولات ایران‌ساخت قرار گرفت

### اخبار فناوری خارجی

افزایش دقت اندازه‌گیری ضریب شکست مواد تا ۱۰۰۰ برابر، به کمک لکه‌های لیزری ریزشناگرهای حساس به نور، برای دارورسانی هدفمند به کار گرفته می‌شوند! ساخت نمایشگر پارچه‌ای جدید در دانشگاه کمبریج شکل تصاویر پیکسلی از اجسامی که با چشم آن‌ها را نمی‌بینیم!

### اخبار علمی

ساخت ماده دوبعدی با خاصیت چندفروئی برای اولین بار در دنیا لنزهای تماسی پلاسمونیک زیست‌سازگار دو بعدی برای اصلاح کورنگی

## دورنما

دورنمایی بر آینده فوتونیک: شگفتی‌ها هنوز در راه هستند  
ارمغان فوتونیک برای خودروهای امروزی  
ارمغان فوتونیک برای صنایع هوایی

## آموزش کاربردی

نور فشرده چیست و چگونه تولید می‌شود؟  
حالت‌های فوک  
نور با خاصیت پادخوشه‌گی

## از علم تا ثروت

نانوفوتونیک، دنیای پنهان فناوری  
معرفی شرکت دانش‌بنیان آرمان جستجوگران انرژی نور  
فعال در زمینه نانوفوتونیک و نانومواد

نور، ابزار مشاهده آنچه نمی‌بینیم!  
معرفی شرکت دانش‌بنیان فتح نور میهن  
طیف‌سنج‌های آرایه‌ای  
سطح‌سنج سه‌بعدی نانومتری  
نانوجابه جاگر پیزوالکتریک

## نوآورانه

لیزرهای آبشاری کوانتومی  
از آغاز تا به امروز  
چالش‌ها، فرصت‌ها و کاربردها

## دروازه‌های علم

سی لیزر در یکی!  
لیزرهای عایق توپولوژیکی  
آرایه‌ای از سی لیزر ساطع‌کننده سطحی با کاواک عمودی

مشاهده مستقیم درهم تنیدگی ماکروسکوپی  
کنترل همبستگی بین سامانه‌های ماکروسکوپیکی  
تضاد در اصل عدم قطعیت هایزنبرگ

۴۲

۴۵

۵۲

۶۰

۶۴

۱۰

۱۴

۱۸

۲۲

۳۴



# اخبار فناوری

درمان زخم‌هاک دیابت با تابش پلاسماک سرد، توسط محققان ایرانی

ساخت نمایشگر پارچاک جدید به سرپرستی دانشگاه کمبریج

ساخت اولین ماده دوبعدک با خاصیت چندفروغ

اخبار داخلی

اخبار خارجی

اخبار علمی





درمان زخم‌هاک دیابت با تابش پلاسما سرد، توسط محققان ایرانی



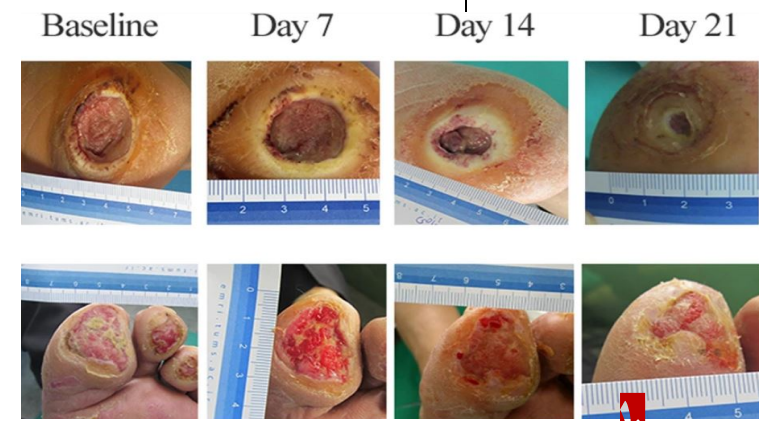
مرتبط با کاربرد پلاسما سرد در بهبود زخم‌های دیابت، توسط محققان این شرکت در مجله Nature به چاپ رسیده است.

در حال حاضر حدود ۳ میلیون نفر در ایران به دیابت مبتلا هستند که نیمی از آن‌ها دچار زخم‌های دیابتی می‌شوند. با روند رو به رشد این آمار، نیاز به توسعه یک روش درمانی که بتواند به صورت موضعی باکتری‌ها را از بین ببرد، ضروری است.

ایده اصلی استفاده از پلاسما سرد در درمان زخم، با توجه به هزینه‌های بالای پانسمان شکل گرفت و در مرحله اول، مطالعات بر روی نمونه‌های حیوانی با همکاری پزشکان صورت گرفت و با موفقیت کامل به پایان رسید. پس از آن بر روی ۷۰ بیمار در بیمارستان شریعتی و مرکز تحقیقات دیابت تهران آزمایش شد.

استفاده از پلاسما سرد گاز هلیوم، علاوه بر از بین بردن باکتری‌ها، با تحریکات سلولی باعث تسریع روند بهبود زخم می‌شود. در حال حاضر کشور آلمان نیز از این فناوری استفاده می‌کند که هزینه‌های آن تا ۸۰۰۰ یورو نیز می‌رسد و بسیار بالاتر از هزینه خدمات دستگاه شرکت هوپاد صنعت پلاسما است. در حال حاضر هزینه

فناوران شرکت دانش‌بنیان «هوپاد صنعت پلاسما» که زیرمجموعه دانشگاه آزاد اسلامی است، پس از سال‌ها تلاش، موفق شدند برای اولین بار در دنیا دستگاهی را برای تزریق پلاسما جهت درمان زخم‌های پوستی بیماران مبتلا به دیابت ابداع کنند. پلاسما سرد کاربردهای گوناگون صنعتی و پزشکی دارد، اما تا پیش از این برای بهبود زخم‌های پوستی استفاده نشده بود. بنا به گفته دکتر سارا فتح‌الله، مدیرعامل این شرکت در گفت‌وگو با «فرهیختگان آنلاین»، در دنیا مطالعات اندکی در این زمینه صورت گرفته است و ایران یکی از اولین کشورهای پیشرو در این زمینه است. همچنین ۲ مقاله



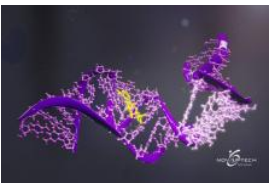
تعیین شده هر بار تابش پلاسما در کلینیک‌های دولتی برای هر بار درمان، ۱۰۰ هزار تومان است. با توجه به اینکه این روش، درمان زخم را با حذف کامل باکتری‌ها تا چند مرحله تسریع می‌کند، هزینه استفاده از آن نسبت به روش‌های دیگر بسیار پایین است. به نقل از ایسنا و بنا به گفته مدیرعامل شرکت هوپاد صنعت پلاسما، در حال حاضر علاوه بر استفاده در داخل کشور، از کشورهای مالزی و آمریکای جنوبی نیز برای صادرات دستگاه پلاسما سرد این شرکت نیز درخواست شده است. با اخذ استاندارد بین‌المللی برای این محصول، به زودی شاهد صادرات آن در بازار بین‌المللی خواهیم بود.

تراشه زیستی ایران ساخت، جهت شناسایی سموم غذایی

برای دستیابی به تشخیص حساس و قابل کنترل باقیمانده‌های آفت‌کش‌ها در محصولات کشاورزی، آپتاسگرهای متعدد مبتنی بر نانومواد، در حال توسعه هستند که قابلیت شناسایی مولکولی آفت‌ها را دارند. به تازگی آپتامرها به عنوان جایگزین قوی آنتی‌بادی‌ها در حسگرهای زیستی استفاده می‌شوند. ترکیب نانومواد و فناوری آپتامر، با توجه به خواص نوری و الکتریکی مناسبی که دارند، دریچه جدیدی را در پایش بقایای آفت‌کش‌ها باز گشوده است.

به تازگی محققان مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی در مشهد، یک تراشه زیستی بلور مایع بر پایه آپتامرها را تولید کرده‌اند که برای شناسایی و سنجش اکرآتوکسین A در مواد غذایی بسیار موثر عمل می‌کند. اکرآتوکسین‌ها، شامل دسته‌ای از متابولیت‌های سمی تولید شده توسط برخی از قارچ‌ها هستند و از مهم‌ترین انواع سموم غذایی به شمار می‌آیند. این آلاینده یکی

از سموم کلیوی و کبدی است که ایمنی بدن را مختل می‌کند و موجب سرطان و اختلالات هورمونی می‌شود. طبق گزارش مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی و به نقل از دکتر اسماء وردیان، مجری این طرح، تراشه زیستی ساخته شده بسیار حساس بوده و با حد تشخیص در محدوده آتومولار برای سنجش اکرآتوکسین در نمونه‌های آب انگور و برنج معرفی شده است. میزان حساسیت این تراشه، بالاترین مقدار گزارش شده برای سنجش اکرآتوکسین است. افزایش سرعت شناسایی، سهولت استفاده و کاهش هزینه تشخیص، از جمله مزایای استفاده از روش پیشنهادی در این دستاورد پژوهشی است. در حال حاضر، روش‌هایی مانند کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا برای سنجش اکرآتوکسین وجود دارد اما نسبت به حسگرهای زیستی بر پایه خواص نوری و الکتریکی نانومواد، بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر هستند. نانوذرات فلزی و نقاط کوانتومی با خواص نوری الکتروشیمیایی منحصربه‌فرد، گزینه‌های مطلوبی جهت حسگرهای زیستی بر پایه آپتامرها هستند. برتری روش پیشنهادی برای تشخیص اکرآتوکسین، حساسیت بالا و قابل حمل بودن آن است که در مرحله بعدی اجرای طرح انجام خواهد شد. این طرح با سرمایه‌گذاری موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی و با همکاری پروفسور هشین-چن از کشور تایوان انجام شده است.



آپتامرها مولکول‌های اسیدنوکلئیک یا پپتیدی هستند که به مولکول هدف متصل می‌شوند. آپتامرها در زمینه پژوهش‌های پایه، داروهای ماکرومولکولی و در صنعت استفاده می‌شوند. استفاده از آپتامرها امکان شناسایی تفاوت‌های بسیار جزئی در مولکول‌های هدف موجود میان جمعیت‌های سلولی را فراهم می‌کند.







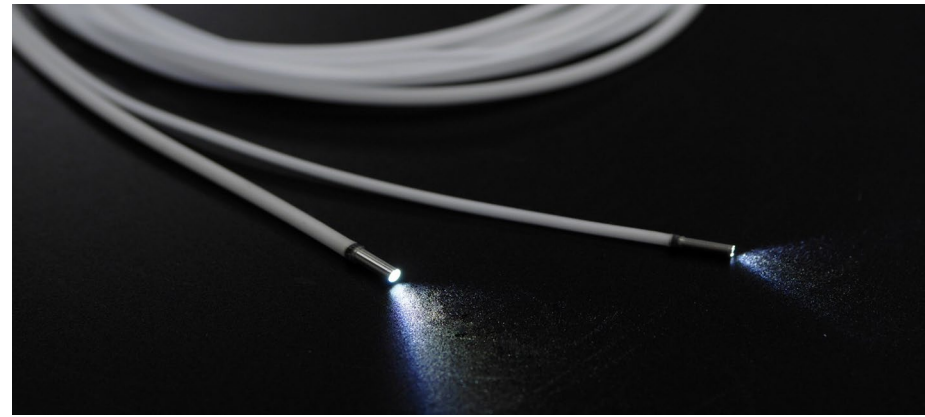
مکمل‌های نانو سوخت‌های هیبریدی می‌توانند با کنترل سطح مولکولی و اتمی و استفاده از خواصی که در سطوح مواد در ابعاد نانو ظاهر می‌شوند، ویژگی‌های جدیدی را در سوخت‌های فسیلی ایجاد کنند. در حال حاضر به منظور ایجاد بستر توسعه، تکمیل الزامات، اخذ استانداردها و مجوزهای توسعه تجاری‌سازی محصول مکمل نانو سوخت، حمایت و سرمایه‌گذاری در راستای تولید محصول امری ضروری است.

تولید مکمل سوخت هیبریدیک برای نجات هواک پاک



این محصول تولید شده توسط فناوران کشورمان قابلیت تولید انبوه داخلی و همچنین صادرات به کشورهای نفت خیز حوزه خلیج فارس را دارد. علاوه بر درآمدزایی مستقیم حاصل از فروش این محصول با ارزش، کاهش اثرات آلودگی هوا و به دنبال آن کاهش بیماری‌های تنفسی و نجات زیست‌بوم کلان‌شهرها، از هزینه‌های هنگفت ثانویه جلوگیری خواهد کرد. دکتر زمزمیان در گفت‌وگو با روابط عمومی پژوهشگاه مواد و انرژی کرج عنوان کرد: «طرح توسعه نانو سوخت‌های مبتنی بر مکمل‌های سوخت دیزل و مازوت در کشور برای اولین‌بار اجرا شده است و نمونه این دانش فنی در کشورهای دیگری مانند هلند، انگلستان و چین نیز تولید شده است». این طرح با هماهنگی پژوهشگاه نیرو وابسته به وزارت نیرو و مجوز شرکت مادر تخصصی برق حرارتی در نیروگاه طرشت و موتور احتراق موجود در آن مرکز، صورت گرفته است و نمونه‌های اولیه مکمل سوخت هیبریدی آزمایش شده است.

آندوسکوپ انعطاف‌پذیر، در زمره محصولات ایران ساخت قرار گرفت



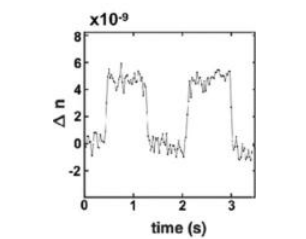
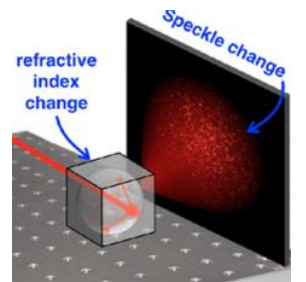
آندوسکوپ انعطاف‌پذیر مبتنی بر فیبر نوری، برای اولین‌بار در کشور توسط فناوران شرکت «فناوری نوین سلامت اردیبهشت»، در آستانه تولید انبوه قرار گرفته است. آندوسکوپ‌های نوری یکی از ملزومات مهم پزشکی هستند که در بسیاری از موارد تصویربرداری تشخیصی و درمانی همچون گوش، حلق، بینی، ریه، گوارش، مجاری ادراری، مغز و اعصاب کاربرد دارند. بنا بر گزارش خبرگزاری تسنیم، بومی‌سازی این محصول می‌تواند واردات آن و خروج ارز در این زمینه را به کلی متوقف کند. با ورود این محصول به بازار داخلی و خارجی، بیش از ۱۵ میلیون دلار صرفه‌جویی ارزی را شاهد خواهیم بود. از آنجایی که آندوسکوپ‌ها نیاز به تعمیرات زیاد دارند، با کسب دانش و فناوری ساخت آن، بسیاری از هزینه‌های معمول تعمیر آن کاهش پیدا خواهد کرد. این محصول که در مرحله آزمایشات بالینی قرار دارد، در حال حاضر با حمایت معاونت علمی ریاست جمهوری در آستانه تولید انبوه قرار گرفته و تا کنون برای



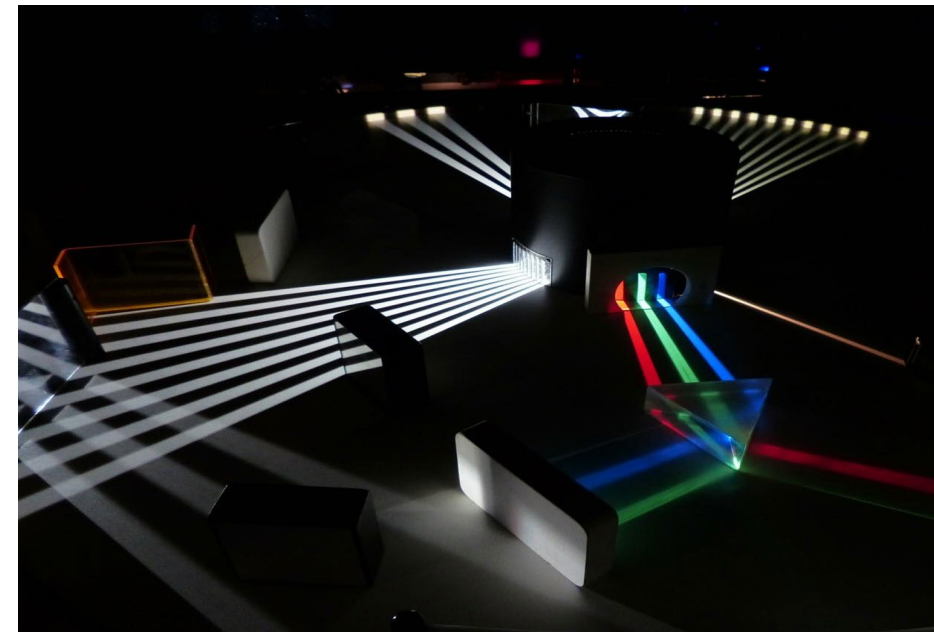
پایه و اساس عملکرد آندوسکوپ‌های پزشکی را می‌توان فناوری فوتونیک دانست. چرا که مشاهده اعضا و اندام‌های داخلی بدن بدون استفاده از عدسی‌ها، منابع نوری، فیبر نوری و حسگرهای تصویر فوتونیک غیر ممکن است. تلفیق این اجزای نوری با فناوری الکترونیک و مکانیک در ابعاد میکرومتر، توانایی پزشکان را در تشخیص، درمان و جراحی اندام‌های داخلی چندین برابر افزایش می‌دهد.





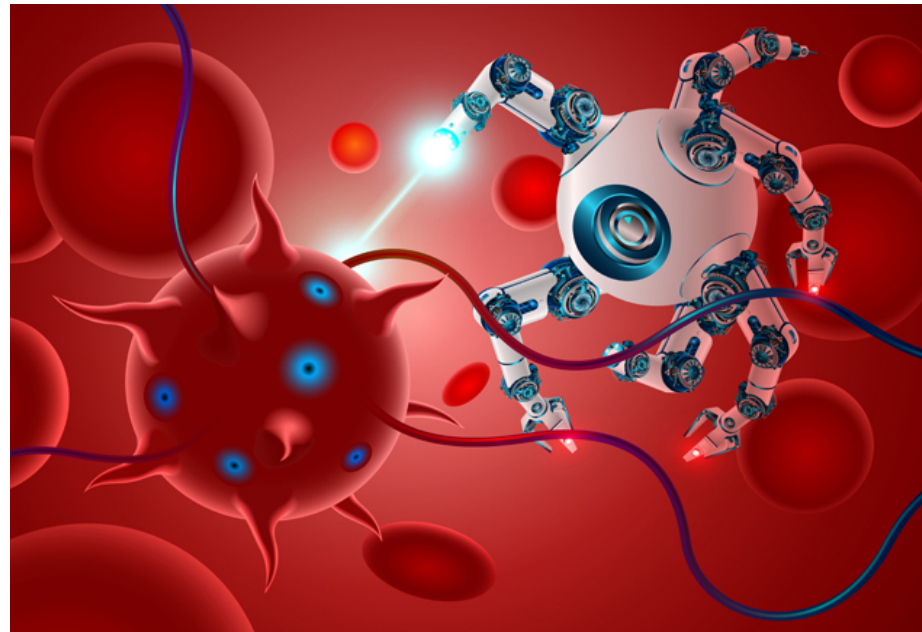


این گروه تحقیقاتی از ابداع خود برای اندازه‌گیری ضریب شکست گازها استفاده کردند و موفق به ثبت تغییرات ضریب شکست تا مرتبه  $10^{-9}$  شدند. نتایج مطالعات آن‌ها ماه فوریه ۲۰۲۲ در مجله ACS Photonics منتشر شده است.



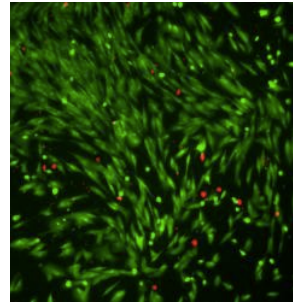
اگر یک نشانگر لیزری را بر روی یک سطح ناهموار مانند یک دیوار رنگ شده، یا یک تکه نوار چسبیده مات بتابانیم، نور لیزر یک الگوی متشکل از لکه‌های نقطه‌ای ایجاد می‌کند. اگر لیزر را حرکت دهیم، الگوی دقیقی که می‌بینیم به طور چشم‌گیری تغییر می‌کند. این حساسیت نسبت به تغییر است که اساس روش ابداع شده توسط محققان دانشگاه آدلاید قرار گرفته است. این رویکرد، فناوری سنجش نوری و کوانتومی را ارتقاء می‌دهد و عملکرد حسگرهای نسل بعدی را بهبود می‌بخشد. دستگاه‌های اندازه‌گیری جدید با استفاده از این روش، قادرند اندازه‌گیری‌های زیستی فوق‌دقیقی را انجام دهند. تغییرات کوچک در ضریب شکست می‌تواند پیامدهای عمده‌ای برای سنجش داشته باشد. به عنوان مثال، عفونت می‌تواند باعث تغییر ضریب شکست گلبول‌های قرمز در سطح بسیار کوچک شود که به راحتی توسط این حسگر قابل تشخیص است. این گروه امیدوارند که بتوانند این رویکرد را نه تنها در زمینه‌های مراقبت‌های بهداشتی، بلکه برای حسگرهای قابل حمل میدانی در صنایع مختلف در پیش بگیرند.

تعیین دقیق ضریب شکست مواد در زمینه‌های مختلف، از حسگرهای زیستی گرفته تا مسافت‌یابی لیزری امری حیاتی است. تاکنون از لکه لیزری به عنوان یک کاوشگر حساس با خواص نوری منحصر به فرد، برای شناسایی محیط بهره گرفته شده است. اما تا پیش از این، اندازه‌گیری‌های ضریب شکست مبتنی بر لکه لیزر، به وضوح  $10^{-6}$  محدود شده بود. گروهی از محققان دانشگاه آدلاید و دانشگاه سنت اندروز اسکاتلند، برای بهینه‌سازی حساسیت لکه‌ها به تغییرات ضریب شکست، روشی را معرفی کرده‌اند که دقت اندازه‌گیری ضریب شکست را ۱۰۰۰ برابر افزایش می‌دهد. این ابداع می‌تواند تمامی فناوری‌های مبتنی بر اندازه‌گیری ضریب شکست را متحول کند. این پژوهشگران از خواص موجی نور برای ایجاد الگوهای نقطه‌ای در اثر تداخل استفاده کردند. آن‌ها نور را با استفاده از یک تکه فیبر شیشه‌ای به عرض یک موی انسان یا یک کره توخالی که نور را درون خود حبس می‌کند، به یک الگوی نقطه‌ای تبدیل کردند. کوچکترین تغییرات در ماده مورد نظر، این الگو را تغییر می‌دهد.



در سال‌های اخیر، دانشمندان طیف گسترده‌ای از روبات‌ها را در شکل‌ها و اندازه‌های مختلف معرفی کرده‌اند. از جمله این روبات‌ها، ریزشناگرهایی هستند که به دقت مهندسی شده‌اند و می‌توانند در آب و مایعات دیگر حرکت کنند. محققان مؤسسه سامانه‌های هوشمند ماکس پلانک، به تازگی ریزشناگرهای جدیدی مبتنی بر نور ساخته‌اند که می‌توانند برای حرکت در محیط‌های زیستی از جمله مایعات بدن مناسب‌تر از سایر ریزشناگرها باشند. این ذرات بر پایه پلی‌کربن نیتريد دوبعدی طراحی شده‌اند که به نور مرئی پاسخ می‌دهند. مواد نیتريد کربنی دارای خواص فوتوکاتالیستی هستند. وقتی نور به آن‌ها تابیده می‌شود، در اثر جذب نور بارهای الکتریکی تولید می‌شود که برای تحریک واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شود. مایعات زیستی دارای حجم زیادی از نمک‌های یونی هستند که مانع تحرک ریزشناگرها می‌شوند. طبق یافته‌های محققان، مواد نیتريد کربنی در حضور یون‌ها خواص بهبود یافته‌ای از خود نشان دادند و برهمکنش‌های کمتری با یون‌های محلول داشتند.

بارهای الکتریکی آزاد شده در اثر جذب نور، با سیالات زیستی واکنش می‌دهند و این واکنش همراه با میدان الکتریکی اطراف ذره، باعث می‌شود ریزشناگرها به راحتی شنا کنند. همچنین هنگامی که نور به نیتريد کربن بتابد، قابلیت ذخیره بارهای الکتریکی را دارد و مانند یک باتری خورشیدی عمل می‌کند. این خاصیت ظرفیت ویژه‌ای برای دارورسانی و ره‌ایش هدفمند دارو در بدن بیماران دارد. نیتريد‌های کربنی، فوتوکاتالیست‌های بسیار کارآمدی هستند. علاوه بر این، سنتز آن‌ها بسیار ساده و ارزان است، زیرا بر اساس پیش‌ماده‌های آلی فراوان، مانند اوره قابل ساخت هستند. ریزشناگرهایی که در گذشته برای دارورسانی معرفی شده بودند، به کپسول‌های مصنوعی متکی هستند. این کپسول‌ها با دارو پر می‌شوند و به مکان‌های خاصی در بدن تحویل داده می‌شوند. با این حال، ساخت این کپسول‌ها می‌تواند هم پیچیده و هم گران باشد. در مقابل، ذرات نیتريد کربنی، کاملاً طبیعی هستند و ساختمانی اسفنجی دارند که حجم قابل ملاحظه‌ای از داروها را می‌توانند حمل کنند.



مطالعه اخیر می‌تواند الهام‌بخش توسعه ریزروبات‌های مقرون به صرفه‌تر در محیط‌های زیستی باشد. ریزشناگرهای آلی جدید می‌توانند برای هر نقطه از بدن که قابلیت نوررسانی داشته باشد، جهت تشخیص بیماری و دارورسانی استفاده شوند. ترکیب این مواد جدید با ریزروبات‌های غیرآلی سنتی نیز می‌تواند عملکردهای جدیدی را امکان‌پذیر کند. نتایج این آزمایشات به تازگی در مجله Science Robotics منتشر شده است.

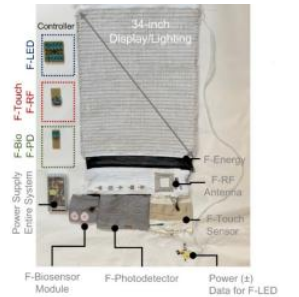




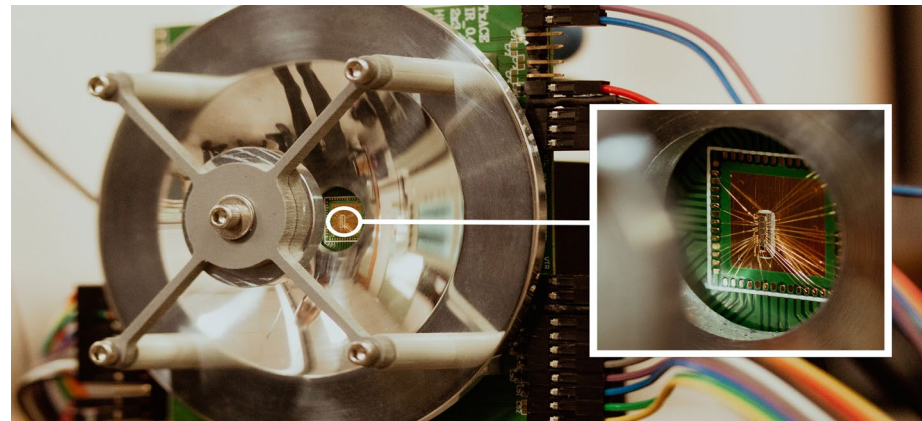
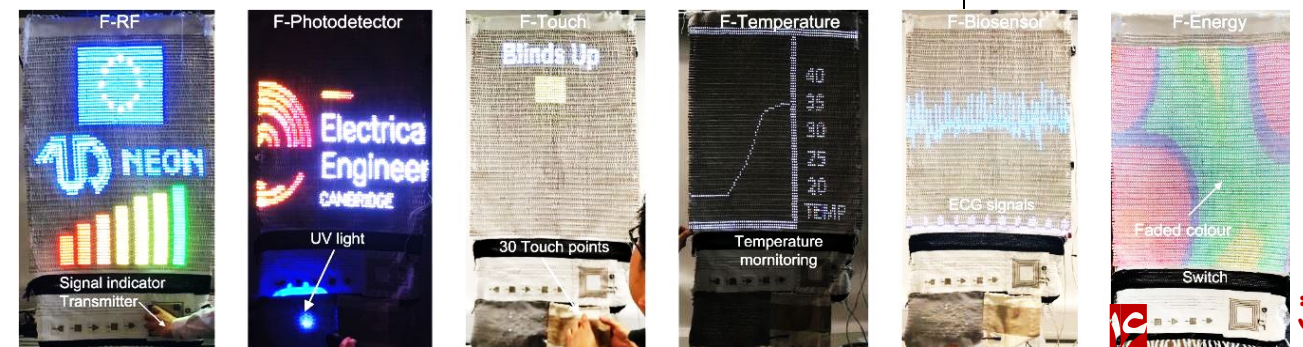
یک گروه بین‌المللی از دانشمندان به سرپرستی دانشگاه کمبریج، یک صفحه نمایش پارچه‌ای هوشمند کاملاً بافته شده تولید کرده‌اند که عملکردهای الکترونیکی فعال، حسگرها، منبع انرژی و ادوات نانوفوتونیک را به صورت یکپارچه در بر دارد. عملکردهای نوری و الکترونیکی، به طور مستقیم در الیاف و نخ‌های این نمایشگر تعبیه شده‌اند که با استفاده از فرآیندهای صنعتی مبتنی بر نساجی، قابل تولید هستند.

رویکرد محققان می‌تواند به کاربردهایی فراتر از تخیل انسان منجر شود. به طور مثال، فرض کنید پرده‌های منزلتان تلویزیون نیز باشند و یا فرش زیر پایتان توانایی جمع‌آوری و ذخیره انرژی را داشته باشد و لباس‌ها و پارچه‌های مختلفی که استفاده می‌کنید، کارکردهای فوق هوشمند داشته باشند!

پیشرفت‌های اخیر در توسعه منسوجات هوشمند، بسیار محدود بوده است و این محدودیت نیز به علت عدم توانایی تولید آن‌ها به کمک صنعت نساجی معمول است. ابداع دانشمندان برای اولین بار است که یک سامانه پیچیده مقیاس‌پذیر در منسوجات را با استفاده از رویکرد تولید مبتنی بر الیاف نساجی ادغام کرده است. ادغام الیاف تخصصی در منسوجات از طریق فرآیندهای بافندگی معمولی به این معنی است که آن‌ها می‌توانند در اشیاء روزمره گنجانده شوند و طیف وسیعی از کاربردهای بالقوه را ایجاد کنند.



پارچه به دست آمده می‌تواند به عنوان نمایشگر عمل کند. ورودی‌های مختلف را نظارت کند یا انرژی را برای استفاده بعدی ذخیره کند. این پارچه می‌تواند سیگنال‌های فرکانس رادیویی، لمس، نور و دما را تشخیص دهد. همچنین می‌توان آن را مانند توپ‌های پارچه‌ای معمولی، جمع کرد و در کاربردهای مختلف استفاده نمود. نتایج این ابداع در مجله Nature Communications گزارش شده است.



محققان دانشگاه تگزاس و دانشگاه ایالتی اوکلاهاما، یک ریزتراشه تصویرساز تراهرتزی را توسعه داده‌اند که می‌تواند از پشت موانعی مانند مه، دود، گرد و غبار و برف، اجسام را شناسایی و از آن‌ها تصویربرداری کند.

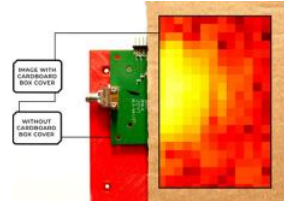
این گروه در حال کار بر روی دستگاهی برای کاربردهای صنعتی است که تصویربرداری از فاصله ۲۰ متری برای این دستگاه ضروری است. این فناوری همچنین می‌تواند در خودروها برای کمک به رانندگان یا سامانه‌های وسایل نقلیه خودران در شرایط خطرناکی که دید را کاهش می‌دهد، موثر واقع شود. برای مثال، در نمایشگر خودرو، این فناوری می‌تواند خطوط و شکل‌های پیکسلی اشیاء مانند دیگر وسایل نقلیه یا عابران پیاده را نشان دهد.

این فناوری به شما امکان می‌دهد تا بتوانید در محیط‌هایی که بینایی ندارید، ببینید. برای مثال، در محیط‌های صنعتی، دستگاه‌هایی که از ریزتراشه‌ها بهره می‌برند، می‌توانند به بازرسی بسته‌بندی برای کنترل فرآیند تولید، نظارت بر میزان رطوبت یا تشخیص بخار کمک کنند. اگر شما یک آتش‌نشان هستید، با این فناوری شما قادر خواهید بود تا از میان دود و آتش اجسام را ببینید.

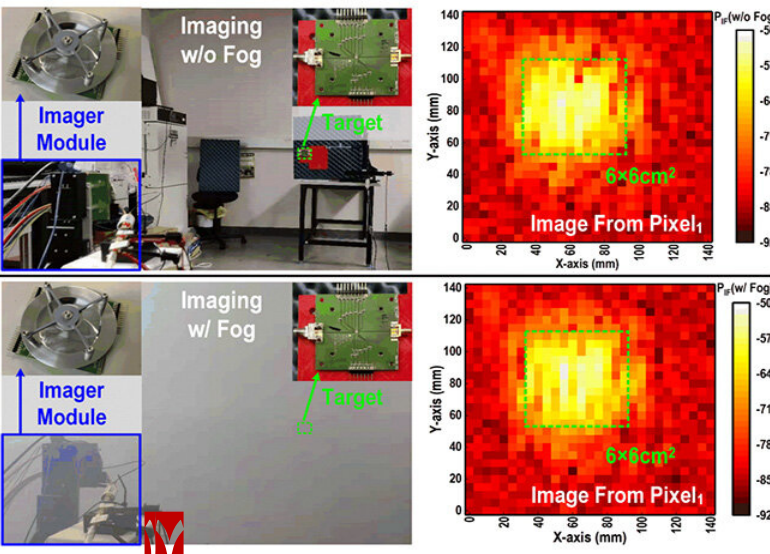
این فناوری جدید تصویربرداری در ۲۱ فوریه در کنفرانس مجازی بین‌المللی مدارهای حالت جامد، رونمایی شد و بیش از ۱۵ سال تحقیقات آن به

طول انجامیده است. این ریزتراشه، پرتوهای تابشی در محدوده تراهرتز (۴۳۰ گیگاهرتز) طیف الکترومغناطیسی را از پیکسل‌های کوچک ساطع می‌کند. این پرتوها از مه، گرد و غبار و سایر موانع عبور می‌کنند. پرتوهای منعکس شده از اجسام به ریزتراشه باز می‌گردد.

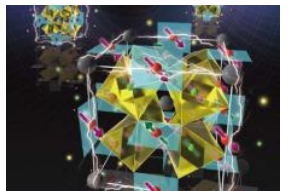
محققان این تصویرگر را با استفاده از فناوری نیم‌رسانای اکسید فلزی (CMOS) طراحی کردند. این نوع از فناوری مدارهای مجتمع برای تولید عمده دستگاه‌های الکترونیکی مصرفی استفاده می‌شود. نکته کلیدی در مورد تصویرگر تراهرتز، کوچک کردن پیکسل‌ها و کاهش توان مصرفی است. یک فرستنده، یک گیرنده و آنتن در منطقه کوچکی ادغام شده‌اند.



این ریزتراشه توانایی تشخیص و تشکیل تصاویر پیکسلی از اجسام را حتی از پشت موانعی مانند یک صفحه مقوایی ضخیم دارد. محققان دانشگاه تگزاس در تلاشند تا با بهره‌گیری از این سامانه، آن را برای کاربردهای گوناگون صنعتی به بازار عرضه کنند.

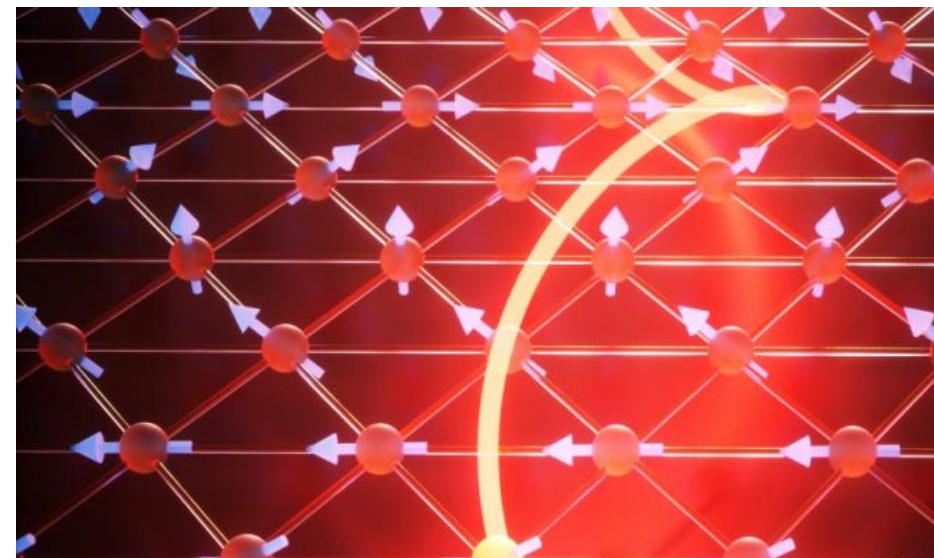






تاکنون، فیزیکدانان فقط خواص چندفروئی را در نمونه‌های نسبتاً بزرگی از مواد سه بعدی مشاهده کرده‌اند که برای کار در بیت‌های حافظه در مقیاس نانو، بسیار بزرگ است. محققان MIT با ساخت ماده جدید دوبعدی، نشان برطرف کرد.

ساخت ماده دوبعدی با خاصیت چندفروئی برای اولین بار در دنیا

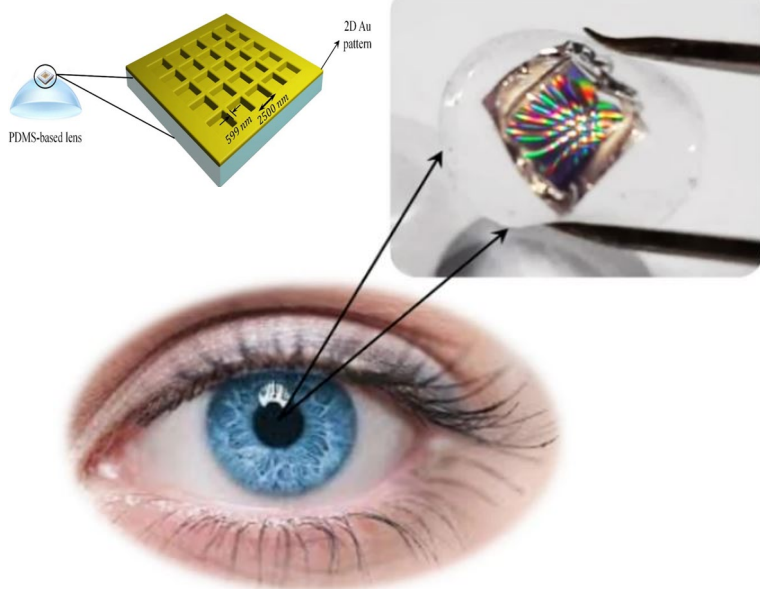


محققان در آزمایشات خود از ماده «پدیدنیکل» ( $\text{NiI}_2$ ) استفاده کردند. پدیدنیکل یک ماده مصنوعی است که به شکل توده‌ای چندفروئی شناخته شده است. اما چگونه آن را به صورت دوبعدی می‌توان تولید کرد؟ در حالی که سایر مواد دوبعدی مانند گرافن را می‌توان به سادگی با لایه‌برداری لایه‌ها از نمونه‌های حجیم مانند گرافیت ساخت، اما پدیدنیکل این‌گونه نیست. فیزیکدانان MIT، به روش جدیدی برای سنتز مواد به شکل دوبعدی نیاز داشتند. آن‌ها از روش رشد هم‌بافته استفاده کردند که در آن ورقه‌های اتمی نازکی از مواد بر روی ماده پایه دیگری رشد داده می‌شوند. محققان از نیتريد بور شش‌ضلعی به عنوان پایه اصلی استفاده کردند که آن را در یک کوره قرار دادند. پودرهای نیکل و یدید درون کوره به شکل لایه‌های دوبعدی روی بستر نیتريد بور رشد کردند. با سرد کردن این لایه‌ها تا دمای ۲۰ درجه کلوین، و با استفاده از آزمایش‌های نوری خاص، خواص فرومغناطیسی و فروالکتريکی لایه‌های دوبعدی یدید نیکل مشاهده شد. با این نوآوری، اکنون فصل جدیدی در دستگاه‌های مبتنی بر مواد چندفروئی آغاز شده است که تا کنون وجود نداشته است.

فیزیکدانان MIT، به تازگی یک حالت عجیب چندفروئی را در ماده‌ای کشف کرده‌اند که به نازکی یک لایه اتمی است. مشاهدات آن‌ها برای اولین بار تأیید می‌کند که خواص چندفروئی می‌تواند در یک ماده کاملاً دو بعدی وجود داشته باشد. این یافته‌ها که در مجله Nature منتشر شده است، راه را برای توسعه دستگاه‌های ذخیره‌سازی داده کوچک‌تر، سریع‌تر و کارآمدتر که با بیت‌های بسیار نازک چندفروئی ساخته شده‌اند، هموار می‌کند. در علم مواد، «فروئیک» به کلیدزنی جمعی هر خاصیت در الکترون‌های یک ماده، مانند جهت‌گیری بار یا اسپین مغناطیسی آن‌ها توسط یک میدان خارجی اشاره دارد. مواد می‌توانند یکی از چندین حالت فروئیک را نشان دهند. در بیشتر موارد، مواد یا فروالکتريک یا فرومغناطیسی هستند. به ندرت هر دو حالت را در یک زمان می‌توان مشاهده کرد. در سال‌های اخیر، دانشمندان موادی را در آزمایشگاه سنتز کرده‌اند که ویژگی‌های چندفروئی را نشان می‌دهند. اما یکی از موانع بزرگ برای ادغام دستگاه‌ها، اندازه است. در واقع با ساخت مواد چندفروئی در ابعاد اتمی، کارایی این مواد چندین برابر خواهد شد.

لنزهای تماسی پلاسمونیک زیست‌سازگار دو بعدی برای اصلاح کورنگی

2D Plasmonic Lens

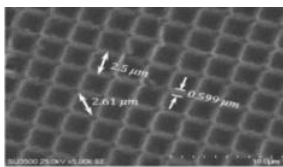


کورنگی یا نقص دید رنگ (CVD)، یک بیماری چشمی است که از تشخیص و درک رنگ‌های خاص توسط سه گیرنده نوری که در بینایی طبیعی همه وجود دارند و بر اساس قله‌های حساسیت طیفی خود عمل می‌کنند، جلوگیری می‌کند. این اختلال چشمی می‌تواند اکتسابی یا مادرزادی باشد. با وجود حجم زیادی از تحقیقات در این زمینه، هنوز درمان مشخصی برای کورنگی وجود ندارد. تغییر در سبک زندگی ما را به سمت بهره‌گیری از راه‌حل‌های مناسب و به‌روزتر سوق می‌دهد.

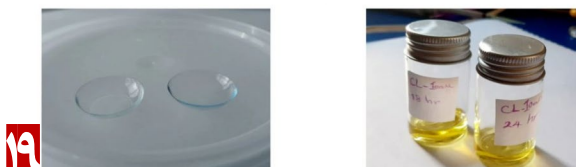
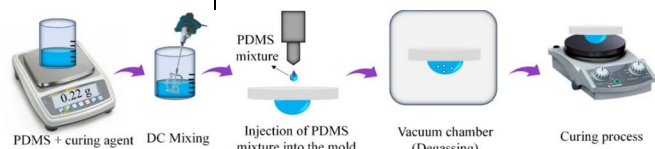
فناوری‌های سودمند و مفیدی مانند ژن‌درمانی، عینک‌های رنگی، لنزها، فیلترهای نوری، عینک‌های اپتوالکترونیک و بهره‌گیری از مزایای پیشرفته گوشی‌های هوشمند و رایانه‌ها، از جمله راهکارهایی هستند که تاکنون به کار گرفته شده‌اند. عینک‌های رنگی با فیلترهای رنگی برای اصلاح کورنگی به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌اند و حتی به صورت تجاری نیز در دسترس هستند. این عینک‌ها در حالی که برای بهبود درک رنگ توسط افراد کورنگ مؤثر است، اما محدودیت‌هایی مانند هزینه بالا، حجیم بودن و ناسازگاری با سایر عینک‌های اصلاح بینایی را نیز در پی دارد. در مطالعات اخیر پژوهشگران دانشگاه شهید بهشتی، لنزهای پلاسمونیک زیست‌سازگار و انعطاف‌پذیر دوبعدی مبتنی بر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS)، برای اصلاح کورنگی پیشنهاد شده‌اند. این لنزها بر روی کورنگی قرمز-سبز، که رایج‌ترین نوع کورنگی است، تأثیر ویژه‌ای دارند.

PDMS یک ماده زیست‌سازگار، انعطاف‌پذیر و شفاف است که می‌تواند کاندیدای خوبی برای ساخت لنزهای تماسی باشد. این ماده غیرسمی توجه بسیاری را در زمینه‌هایی مانند زیست‌شناسی، پزشکی و شیمی به خود جلب کرده است.

در آزمایش‌های انجام شده، یک لنز دو بعدی منعطف و زیست‌سازگار مبتنی بر PDMS با استفاده از یک طراحی کم‌هزینه و ساده بر اساس روش نانولیتوگرافی نرم با موفقیت ساخته شد و برای اصلاح کورنگی قرمز-سبز مورد بررسی قرار گرفت. پایداری لنزهای تماسی پلاسمونیک ساخته شده در محلول سالین بافر فسفات (PBS) مورد بررسی قرار گرفت و لنزهای پیشنهادی، پایداری مطلوبی را در محلول PBS از خود نشان دادند. زیست‌سازگاری، هزینه کم، پایداری و روش ساخت ساده این لنزهای تماسی می‌تواند بینش جدیدی در مورد برنامه‌های اصلاح کورنگی ارائه دهد. نتایج این تحقیقات، فوریه ۲۰۲۲ در مجله Scientific Reports منتشر شده است.

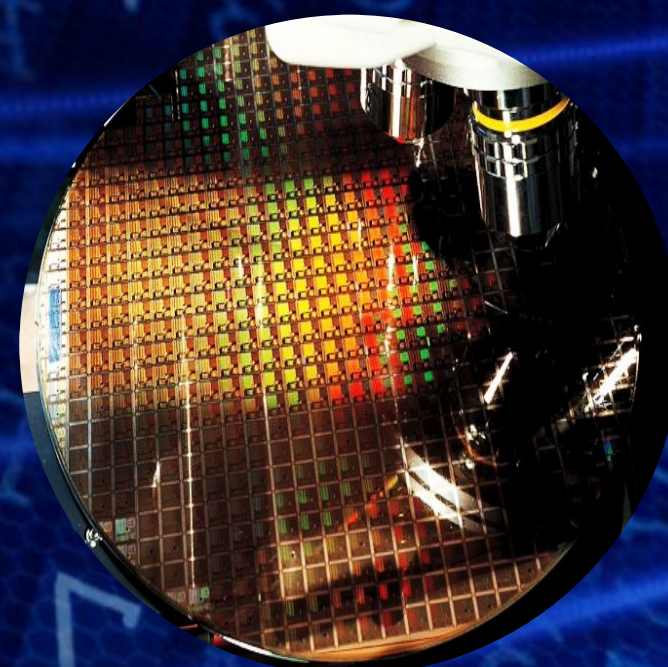


نانوذرات فلزی که در یک آرایه تناوبی چیده شده‌اند می‌توانند تحریکات بسیار ظریف و قوی به نام رزونانس شبکه سطحی پلاسمونیک را از خود نشان دهند.





# دورنما



## دورنمایی بر آینده فوتونیک: شگفتی‌ها هنوز در راهند!

آیا می‌دانستید علم و فناوری فوتونیک تا چه اندازه در زندگی ما رسوخ کرده است؟

آیا می‌توانید پیش‌بینی کنید که فوتونیک چه تغییراتی در زندگی آینده بشر ایجاد خواهد نمود؟

آیا می‌دانید فوتونیک یکی از بنیان‌هاک اصلی انقلاب صنعتی بعدی موسوم به صنعت ۴ خواهد بود؟

در دورنمای این شماره از نشریه فوتونیک و مواد پیشرفته با ما همراه باشید تا به این پرسش‌ها پاسخ دهیم.





**دورنمای برآینده فوتونیک: شگفته هاهنوز در راه هستند**

با اینکه سال ۲۰۱۵ به نام سال جهانی نور نامگذاری شد، هنوز هم بشریت به اهمیت نور در زندگی و پیشرفت‌های خود پی نبرده است. همان طور که نعمت‌هایی مانند اکسیژن و آب مورد کم‌توجهی انسان‌ها قرار گرفته، نور نیز همواره با کم‌لطفی مواجه بوده است. می‌توان گفت که تقریباً تمام انرژی مورد استفاده ما در کره زمین، از سوخت‌های فسیلی گرفته تا انرژی‌های تجدیدپذیر بادی، آبی و

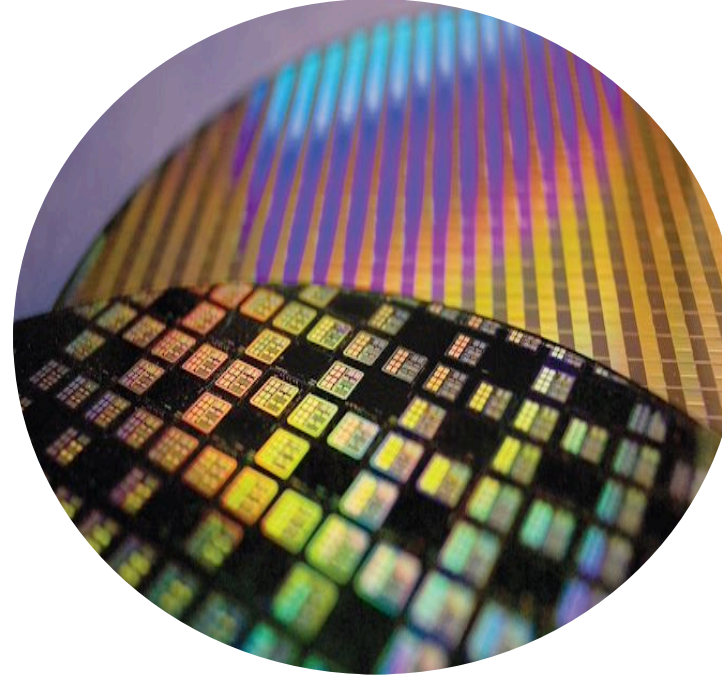
دیجیتال وجود نداشت یا زمانی را که فوتون‌ها هنوز کره زمین را به دهکده جهانی تبدیل نکرده بودند، به یاد نمی‌آورند. در زمان‌های کمی قبل‌تر برای تصویربرداری با پرتوی ایکس از استخوان‌های شکسته به پردازش‌های شیمیایی و فیلم‌های عکاسی بزرگی نیاز بود. بعلاوه مراجعه به پزشک برای بررسی تصاویر و دریافت دستورالعمل روند درمان به صورت حضور امری اجتناب‌ناپذیر بود. این در حالی است که امروزه



خورشیدی از نور خورشیدی که میلیاردها سال است بر ما می‌تابد، نشئت گرفته‌اند. علاوه بر این، دسترسی ما به فناوری‌های نوین و پیشرفته امروزی نیز مرهون نور و قابلیت‌های علم فوتونیک است که این موضوع نه تنها در میان مردم عادی، بلکه در جامعه علمی نیز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. اغلب نسل جوان امروزی که حتی هم اکنون در حال مطالعه این بخش از ماهنامه فوتونیک و مواد پیشرفته هستند، دورانی را که عکاسی



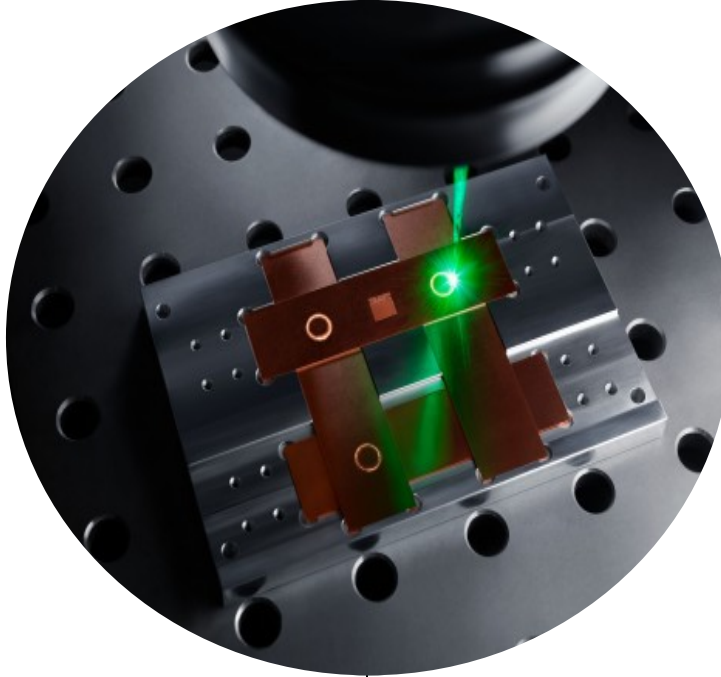
پزشکان می‌توانند به صورت برخط و با پردازش‌های رایانه‌ای به بررسی اندام‌های داخلی بدن انسان بپردازند. از راه دور بیمار را ملاقات کنند و حتی برای وی نسخه الکترونیکی صادر کنند. تصویربرداری دیجیتال در سال ۱۹۶۹ توسط بویل و اسمیت معرفی شد. با اینکه این افراد در سال ۲۰۰۹ جایزه نوبل نیز دریافت کردند، هنوز می‌توان گفت که ترکیب عکاسی و پردازش تصاویر در ابتدای راه شکوفایی خود است. هوش مصنوعی اعمال شده به تصاویر ممکن است در



آینده باعث تغییر شغل آتلیه‌های عکاسی و تبدیل آنها به پردازش‌گرهای رایانه‌ای شود. حوزه تاثیر فوتونیک واقعا شگفت‌آور است. زندگی امروزی به شدت به تراشه‌ها و حافظه‌های نیم‌رسانا وابسته است. آیا می‌دانید که بیشتر از ۱۰ میلیارد ترانزیستور سیلیکانی در قلب گوشی‌های تلفن همراه هوشمند که هم اکنون در دست شماست، وجود دارد؟ آیا می‌دانید که ساخت چنین فناوری‌هایی بدون استفاده از لیزرهای قدرتمند، دقیق و قابل اطمینان میسر نخواهد بود؟ آیا می‌دانید که

صفحه نمایش و دوربین‌های گوشی شما کاملاً در حوزه علم و فناوری فوتونیک قرار می‌گیرند؟ اکثر افرادی که از این افزارها استفاده می‌کنند با جادویی که پشت چاپ مدارهای با ابعاد ۷ نانومتری قرار دارد و به زودی به ۵ نانومتر و ۳ نانومتر نیز خواهند رسید، آشنا نیستند. این پیشرفت متکی بر فوتونیک در کنار قانون مور، چالش‌های جدیدی را برای ما به همراه آورده است. پیشرفت در فناوری نیم‌رساناها به خلاقیت‌های جدیدی نیاز دارد. در فناوری

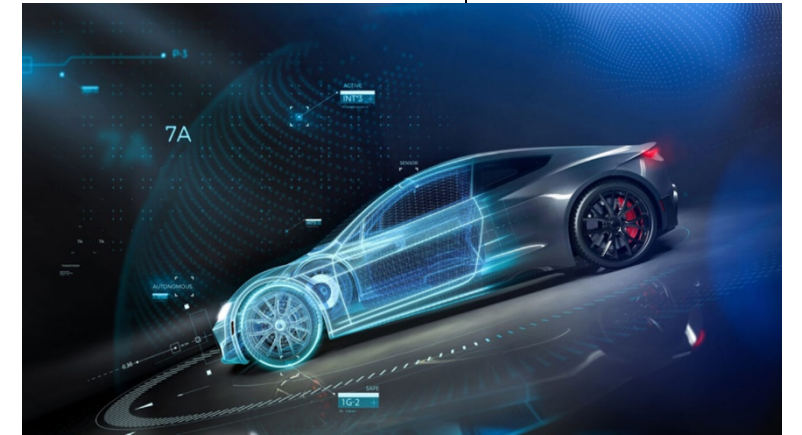
نیم‌رساناهای ۵ نانومتری، در هر ترانزیستور تنها ۲۵ اتم سیلیکان جای می‌گیرد، به این ترتیب، اثرات کوانتومی بیش از پیش خود را به رخ می‌کشند. افزایش سرعت دریافت و ارسال اطلاعات با استفاده از این تراشه‌ها و نیز تلفات حرارتی تولید شده در چنین پردازش‌های پرتراکمی، همین حالا نیز به یک مشکل جدی تبدیل شده‌اند. رفع این چالش‌ها در آینده با جایگزینی فوتون‌ها به جای الکترون‌ها صورت خواهد پذیرفت. در دهه ۱۹۸۰ میلادی با در نظر گرفتن قانون آبه، گمان می‌شد که دیگر دوران



لیتوگرافی نوری به پایان رسیده است، اما خلاقیت دانشمندان و مهندسان توانست بر این حد نیز فائق آید و فناوری و اقتصاد جهانی را به جایگاهی که امروز در سال ۲۰۲۲ در آن قرار داریم، برساند. در برخی رویکردها، تولید تراشه‌های رایانه‌ای را می‌توان به عنوان پیش‌رانه انقلاب صنعتی بعدی یا به اصطلاح صنعت ۴ در نظر گرفت. دقت ابزارهای لیزری، اندازه‌گیری دقیق، تولید مواد پیشرفته با استفاده از لیزر و افزودنی‌های شیمیایی و بینایی ماشین هوشمند،







تصویر آینده خودروسازی بدون وجود فناوری فوتونیک، دیگر محال به نظر می‌رسد. امید است که خودروسازهای داخلی نیز بتوانند با بهره‌گیری از توانایی متخصصان داخلی این حوزه، به امنیت و راحتی خودروهای خود بیفزایند و حتی ارزش افزوده محصولات خود را افزایش دهند.



## ارمغان فوتونیک برای خودروها

### امروز

شاید در نگاه اول، خودرو یک وسیله مکانیکی به شمار آید، اما توسعه خودروهای امروزی چه به صورت خودران و چه به صورت کمک به راننده، باعث شده است تا فناوری‌های فوتونیک جایگاه مهمی را در صنعت خودروسازی نوین به خود اختصاص دهند و بازار جالب توجهی را به تصرف خود درآورند.

اگر فناوری‌های نورپردازی خودرو را که جز قدیمی‌ترین کاربری‌های فوتونیک در این صنعت هستند، کنار بگذاریم، شاید تعداد زیاد حسگرها و مدارهای مجتمع فوتونیک که در یک خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرند، باعث تعجب شما شوند!

در یک خودروی امروزی، از انواع مختلف فناوری‌های فوتونیک شامل دوربین‌های پیشرفته، رادارها، لیدارها و حتی توری‌های پراش فیبری برای ایجاد تجربه رانندگی امن و لذت‌بخش بهره گرفته می‌شود.



در این خودروها، حتی اگر حواس شما به جاده نیز نباشد، خودرو به صورت هوشمند و با استفاده از حسگرهای فوتونیک، امنیت سفر شما را تضمین خواهد کرد.

فناوری لیدار که به عنوان مکمل رادار و دوربین‌های جانبی خودرو استفاده می‌شود، می‌تواند با پوشش فعال لیزری، فاصله و سرعت اجسام اطراف خودرو را بسنجد. این فناوری با هزینه پایین، حجم کوچک و قابلیت تولید انبوه، توجه سرمایه‌گذاران متعددی را از شرکت‌های بزرگ خودروسازی به خود جلب کرده است و ما هر روز شاهد معرفی فناوری جدیدی از این خانواده با دقت و کیفیت بالاتر هستیم.

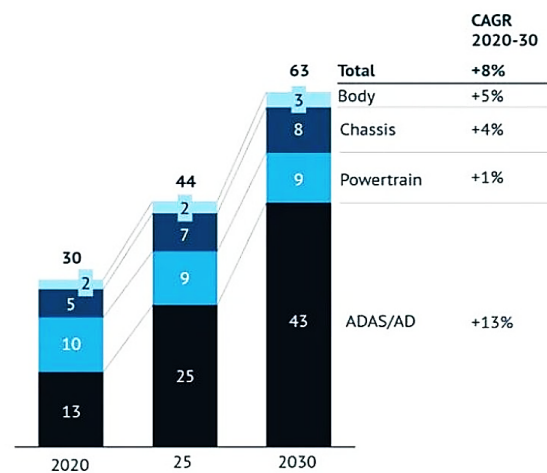
یکی دیگر از شگفتی‌های فوتونیک در صنعت خودروسازی، توری‌های پراش براگ فیبری هستند که با دارا بودن مزایایی مانند ابعاد کوچک، پاسخ سریع، دامنه حسگری گسترده و چند پارامتری و نیز مقاومت در برابر تداخلات الکترومغناطیسی، به جایگاه مهمی در میان فناوری‌های مورد تقاضای خودروسازان امروزی دست یافته‌اند.

حسگرهای فوتونیک در سال ۲۰۲۰ بازار ۳۰ میلیارد دلاری را به خود اختصاص دادند. پیش‌بینی می‌شود، حجم این بازار تا سال ۲۰۳۰ به رقمی بالغ بر ۶۳ میلیارد دلار برسد.



بیشترین میزان رشد بازار مربوط به حسگرهای رانندگی خودکار و کمک به راننده هستند که هر ساله شاهد رشد ۱۳ درصدی خواهند بود. پس از آن، حسگرهای بدنه، سامانه‌های نوری تعلیق و سامانه‌های رانشی به ترتیب با رشد ۵، ۴ و ۱ درصدی در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند.

در واقع، دوربین‌ها و حسگرهای مختلف باعث شده‌اند که دیگر خودروها دارای نقاط کور نباشند. خودروهای خودران شرکت تسلا که با دوربین مسیر را تشخیص می‌دهند، تنها بخش کوچکی از مزایایی را در اختیار دارند که دانش فوتونیک برای صنعت خودروسازی به ارمغان آورده است.



به طور خلاصه، حسگرهای فوتونیک، فضای وسیع و موقعیت‌های زیادی را برای خلایق در صنعت خودروسازی در اختیار ما می‌گذارند. استفاده از این فناوری‌ها، علاوه بر افزایش امنیت و راحتی در رانندگی با منافع اقتصادی هنگفتی نیز همراه خواهد بود. با پیشرفت خودروها و افزایش تعداد اجزای الکترونیکی آن‌ها و نیز حرکت در جهت تولید خودروهای تمام الکترونیک، حسگرهای فوتونیک راه‌حلهای کم هزینه و کم توانی را در اختیار سازندگان خودرو قرار می‌دهند که بازدهی خودروها را افزایش دهند.



### ارمغان فوتونیک برای صنایع هواپیما

ژیروسکوپ‌های فوتونیک که در هواپیماهای پهن پیکر مسافری امروزی قرار دارند، خلبانی را به صورت خودکار در آورده‌اند. این در حالی است که هنوز باید منتظر قطب‌نماهای فوتونیک کوانتومی باشیم که خلبانی را حتی از این هم ساده‌تر خواهند کرد. اندازه‌گیری‌های لیزری سرعت و باد نیز منجر به امنیت بیشتر پروازها خواهد شد. فوتونیک، تمامی روش‌های حمل و نقل را دچار تحول خواهد نمود و حتی راه‌های جدیدی را به وجود خواهد آورد که تا پیش از آن حتی قابل تصور هم نبوده‌اند.

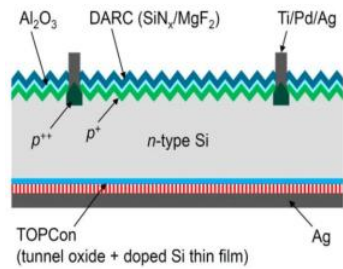
### آینده و واقعیت‌های فوتونیک

واقعیت مجازی، واقعیت افزوده و واقعیت ترکیبی از دیگر کاربردهای فوتونیک بوده که امروزه به شدت در حال توسعه هستند. با اینکه مفاهیم اولیه این فناوری‌ها سال‌ها پیش تدوین شدند، تحقق بازار آن‌ها به کمک پیشرفت‌های فوتونیک و پردازشگرهای ارزان قیمت در حال انجام است.

پیش‌رانه اصلی سرمایه‌گذاری در این فناوری‌ها، صنعت سرگرمی و بازی‌های رایانه‌ای است اما کاربردهای گسترده‌تری در زمینه‌های پزشکی، آموزشی و صنعت چهارم را هم می‌توان برای آن‌ها تصور کرد.

### فوتونیک و خورشید

بهره‌گیری از انرژی خورشیدی یکی دیگر از دستاوردهای مهم فوتونیک تا به امروز است. تنها در سال گذشته با وجود بیماری کرونا، بیش از ۱۰۰ گیگاوات توان خورشیدی به صورت نیروگاه‌های فوتولتائیک به ظرفیت تولید کشورهای مختلف جهان افزوده شده است. این گسترش چشمگیر پیش‌تر هم توسط افرادی که از مزایایی زیست محیطی و اقتصادی این فناوری آگاه بودند، پیش‌بینی می‌شد و امروزه محقق شده است. با این حال، گذار از منابع انرژی سنتی به انرژی خورشیدی و سایر انرژی‌های تجدیدپذیر هنوز با ظرفیت‌های آن‌ها فاصله زیادی دارد. به طوری که انرژی‌های تجدیدپذیر تنها در حدود ۲۰ درصد از مصرف برق جهان را تامین می‌کنند.



امروزه انرژی خورشیدی از نظر اقتصادی نیز به صرفه است و می‌تواند با مهندسی فوتونیک، اقتصادی‌تر نیز شود. ذخیره‌سازی انرژی، سابقه طولانی مدت استفاده بشر از سوخت‌های فسیلی و جوامعی که بر پایه آن شکل گرفته‌اند و مباحث سیاسی دیگر، گذار کامل به انرژی خورشیدی را دشوار کرده است. اما از هم اینک نیز انرژی خورشیدی به عنوان منبع اصلی نیروگاه‌های تازه تاسیس شناخته می‌شود.

دوران انرژی‌های فسیلی در نهایت با تمام شدن این منابع به پایان خواهد رسید. اما چه بهتر است که پایان این دوران به دلیل حفاظت از سیاره و با سرعت بیشتری صورت پذیرد. در هر دو صورت، فوتون‌هایی که از خورشید ساطع شده‌اند و به زمین می‌رسند، نقش بسیار مهمی در تامین انرژی آینده بشر خواهند داشت.

در حال حاضر سریع‌ترین رشد در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر به صنعت فتولتائیک خورشیدی تعلق دارد و با همین شتاب تا سال ۲۰۳۰ و پس از آن پیش خواهد رفت. در سال ۲۰۱۷، این فناوری تنها حدود ۲ درصد از برق جهان را تامین کرده که تنها یک دهم برق تامین شده توسط برق آبی بوده است.

تا سال ۲۰۳۰، انتظار می‌رود که تولید انرژی‌های خورشیدی با آبی برابر شود و هر دو منبع حدود ۱۵٪ از کل برق تولید شده را تامین کنند.

در حال حاضر اکثر سامانه‌های فتولتائیک مستقر در سطح جهانی را سلول‌ها و ماژول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکان تشکیل می‌دهند که سهم بازار آن بیش از ۹۰ درصد است که ناشی از بلوغ این فناوری و تولید انبوه سریع در سطح جهانی است. بهبود عملکرد و پایداری سلول‌های خورشیدی زیر نور خورشید با توجه به دوره‌های طولانی مورد انتظار استقرار موضوع مهم تحقیق و علاقه تجاری در سال‌های اخیر بوده است.

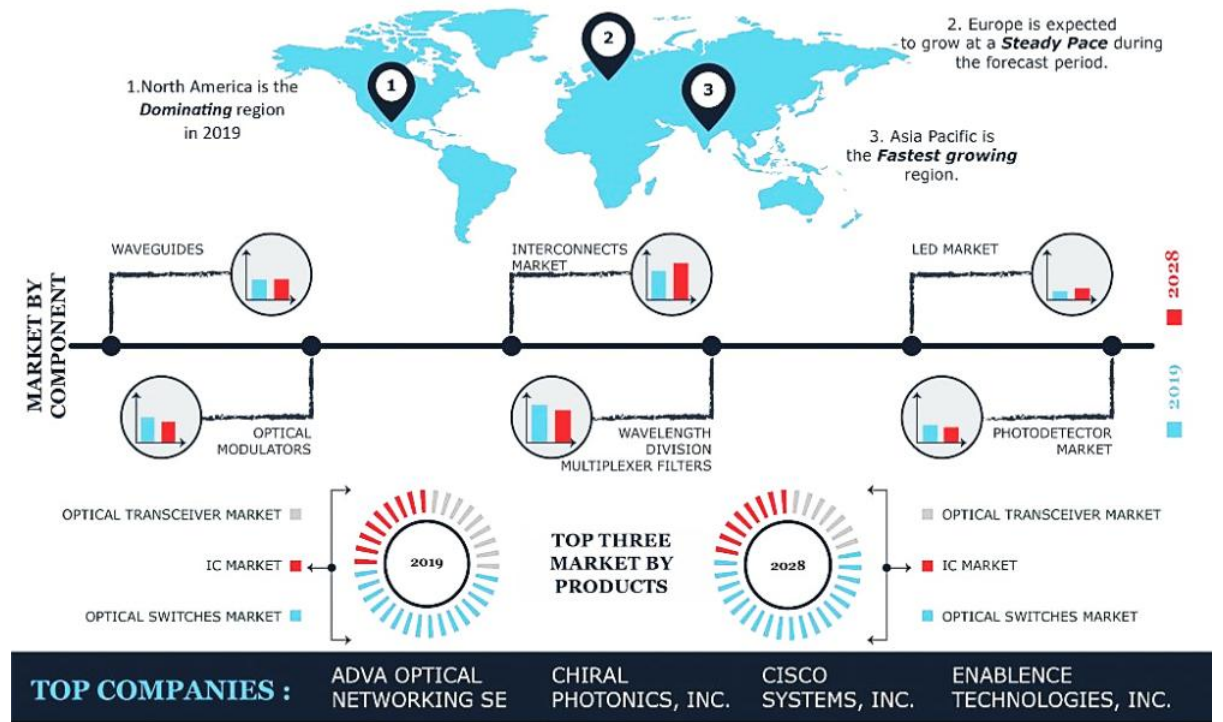
اگرچه بهره‌گیری از مواد آلی، پروساکایت‌ها، کادمیم تلوراید و CIGS هم دستاوردهای جالب توجهی را به همراه داشته است، اما سلول‌های مبتنی بر سیلیکان همچنان پیش‌تاز میدان خواهند بود. چرا که بستر مناسبی برای بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی سیلیکان کریستالی وجود دارد. Silicon PV حدود ۹۵٪ سهم بازار را در اختیار دارد و در دهه آینده همچنان بر بازار تسلط خواهد داشت. در چند سال آینده، تمرکز اصلی ارتقای این فناوری بر بهبود کارایی و قابلیت اطمینان فناوری‌های امیتر غیرفعال و سلول عقب (PERC) معطوف خواهد بود. برای این منظور از فناوری‌هایی مانند TOP-CON و سیلیکان پیوندی چندگانه به دلیل کارایی بالاتر و در برخی موارد، رقابتی‌تر، ضرایب دمایی پایین‌تر در آب و هوای گرم بهره گرفته خواهد شد. بازده ماژول‌های سیلیکانی تا سال ۲۰۳۰ در مقیاس

سلول خورشیدی TOPCON به عنوان نسل بعدی فناوری سلول‌های خورشیدی پس از PERC شناخته می‌شود. این معماری جدید توسط محققان موسسه Fraunhofer برای سامانه‌های انرژی خورشیدی در آلمان در سال ۲۰۱۳ معرفی شده است. TOPCON فرم اختصاری عبارت Tunnel Oxide Passivated Contact است





GLOBAL SILICON PHOTONICS MARKET FORECAST 2019-2028



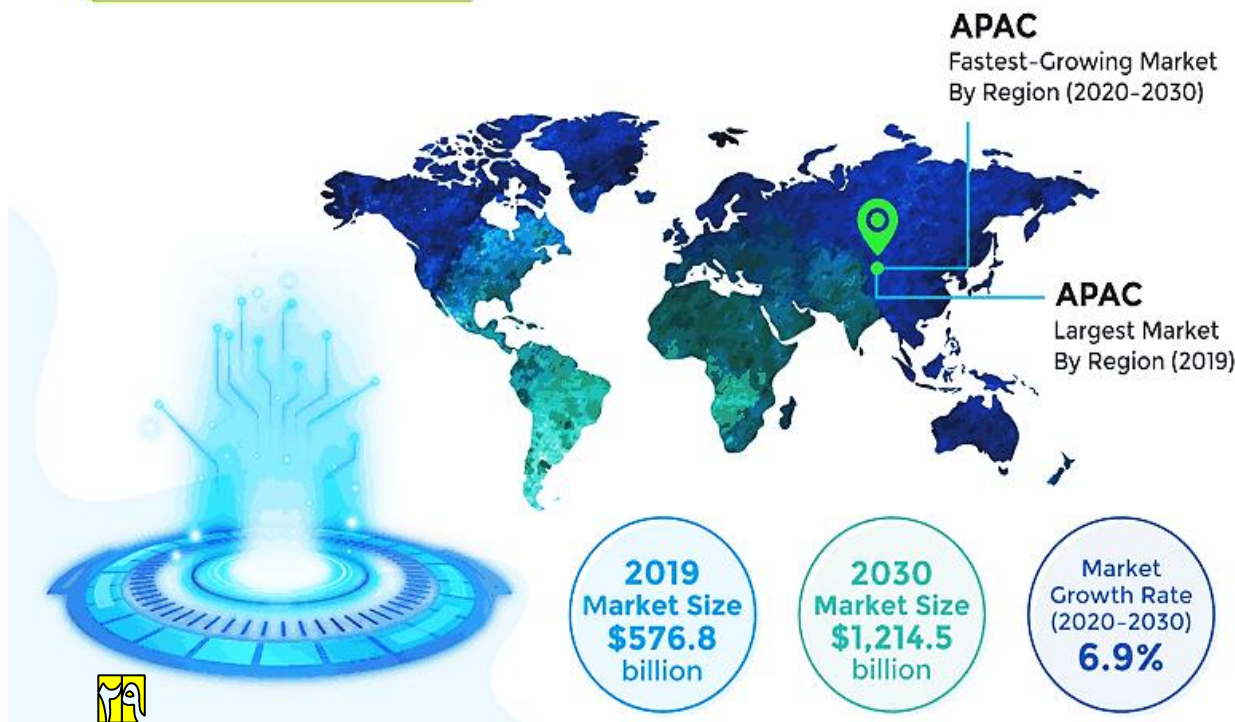
معجزه فوتونیک در پزشکی

ژنومیک که رسته‌ای از علم با ظرفیتی فراوان است و هم اکنون نیز برای درمان‌های خاص به کار می‌رود، به شدت به اپتیک و پردازشگرهای قوی (چاپ شده با فوتونیک) نیازمند است. دسترسی به اطلاعات ژنتیکی به آن چنان قدرت پردازشی نیاز دارد که از نرخ پیش‌بینی شده در قانون مور هم پیشی می‌گیرد. ما تا به امروز، تنها توانسته‌ایم ذره کوچکی از پیچیدگی و حساسیت دنیای ژن‌ها را درک کنیم. تعداد آزمایشگاه‌های پزشکی که از پژوهش‌ها و روش‌های مبتنی بر فوتونیک استفاده می‌کنند به شدت در حال افزایش است که البته تمرکز بیشتر این بخش‌ها بر روی شناسایی بیماری است. اگر فقط بخواهیم از روش‌های میکروسکوپی که از حد آبه عبور می‌کنند و در پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند نام ببریم، به دلیل تعدد این روش‌ها ممکن است روشی از قلم بیفتد!

علم و فناوری فوتونیک در این حوزه، از تصویربرداری رایج نوری در انواع کلینیک‌ها گرفته تا روش‌های بینایی‌سنجی و حتی اندازه‌گیری‌های حساس نوری از مایعات بدن، همه و همه را در بر می‌گیرد. چشم پزشکان را می‌توان به عنوان اولین گروهی که از فناوری فوتونیک در شناسایی و درمان بیماری استفاده کردند، در نظر گرفت. مدت مدیدی است که از لیزرها برای درمان انحرافات چشمی و اعوجاجات قرنیه استفاده می‌شود و حالا لیزرهای فمتوثانیه به عنوان بهترین درمان برای جراحی آب مروارید بر شمرده می‌شوند. از لیزر برای اصلاح دید نیز استفاده می‌گردد. پرتونگاری مقطعی و روش‌های تصویربرداری از قرنیه که روش‌های فراگیری در شناسایی مشکلات چشمی هستند، حتی می‌توانند به عنوان هشداردهنده‌های زود هنگامی برای بیماری‌های اعصاب چشمی نیز به کار روند تا از پیشرفت آن‌ها جلوگیری شود.

بعلاوه در شماره‌های پیشین نشریه، دستاوردهای شگفت‌انگیز دانشمندان در حوزه‌های مختلف پزشکی را مطالعه کرده‌اید که نویدبخش توسعه پرستاب روش‌های تشخیص و درمان است. از آن جمله می‌توان به ابداع روش‌های تصویربرداری و میکروسکوپی نوین اشاره کرد. ضمن آن که بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشینی و هوش مصنوعی، دقت روش‌های تشخیصی را حتی در حد اتمی و مولکولی ارتقا داده است.

GLOBAL PHOTONICS MARKET



استفاده می‌شود. لیزرهای فوق دقیق لایگو توانسته‌اند فرضیه‌هایی که بیش از صد سال پیش مطرح شده‌اند را به اثبات برسانند و لیزرهایی با توان اگزاواتی به زودی دانش ما از فیزیک خلا را محک خواهند زد. پویشگرهای اتوثانیه‌ای در حال ارتقای دانش ما در زمینه بنیادی رفتارهای اتم‌ها و مولکول‌ها هستند. از سوی دیگر زمین پس به دقت فوق‌العاده ساعت‌های اپتیکی در بازتعریف زمان نیاز مبرم خواهیم داشت. اخترشناسی همیشه به اپتیک وابسته بوده است. همواره با دیدن تصاویر سیاره کوچک و آبی که از تلسکوپ هابل ارسال می‌شد، به وجد می‌آمدم و تا چند ماه دیگر تصاویری که از تلسکوپ جیمز وب دریافت خواهیم کرد، بار دیگر ما را شگفت‌زده خواهد کرد. با این حال، حوزه سلامت و درمان را می‌توان به عنوان بزرگترین موفقیت فوتونیک در نظر گرفت.

صنعتی به ۲۵٪ نزدیک خواهد شد. با توجه به ارتقای سریع و مداوم در عملکرد ماژول PV Si، فناوری‌های رقیب برای به دست آوردن سهم بازار بدون تغییرات اساسی در ساختار هزینه یا CAPEX برای محصولات خود با مشکل مواجه خواهند شد.

ردپای فوتونیک در علوم مختلف

اگر به جنبه‌های مختلف تولید علم نیز نگاه کنیم، تاثیرات فوتونیک را در جای جای آن خواهیم دید. شناسایی ذرات در سرن، سوپر-کامیونانده، گران ساسو و ... به شدت به آشکارسازهای نوری وابسته است. روش‌های اپتیکی به علم شیمی کمک شایانی می‌کنند. از لیزرها برای مشخصه‌یابی پلاسماها، مواد حالت جامد و هر نوعی از ماده از سنگ‌های روی سیاره مریخ گرفته تا چشم و پوست انسان



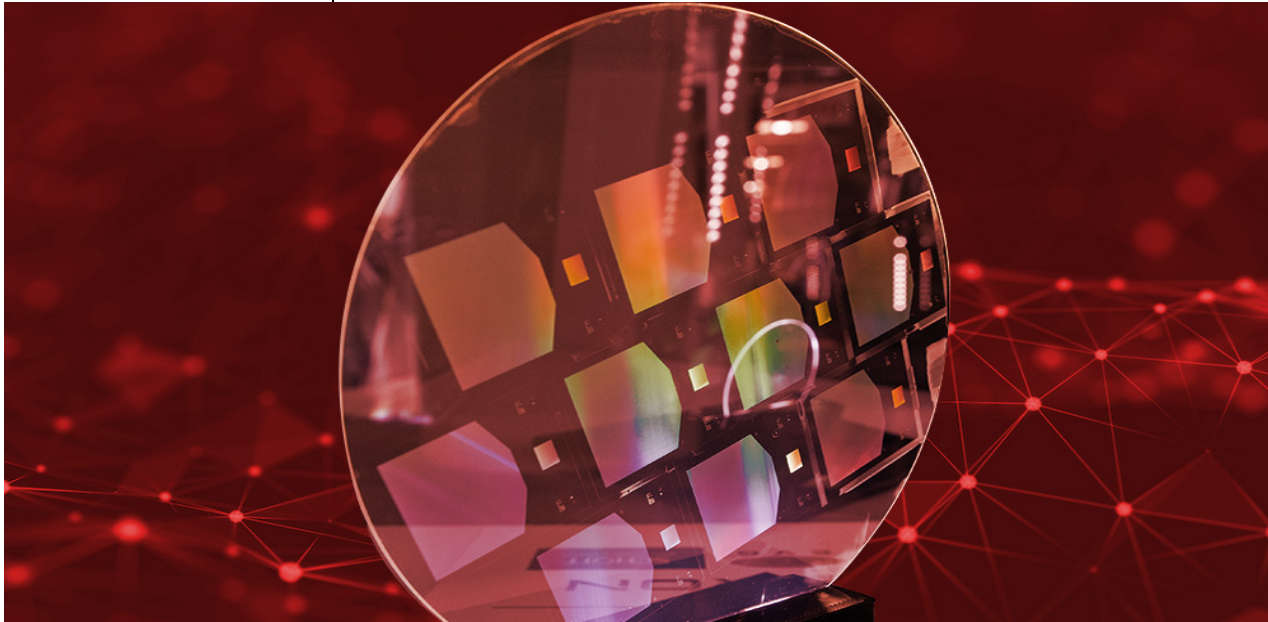
امروزه، روش‌ها و تجهیزات خلاقانه‌تر فوتونیک که بر روی تلفن‌های همراه یا سایر ادوات هوشمند مانند مچ‌بندها و ساعت‌ها سوار می‌شوند، بسیاری از آزمایشات پزشکی و حتی تحلیل نتایج آن‌ها را به خانه آورده‌اند. استفاده از چنین افزاره‌هایی در مناطقی که با کمبود تجهیزات پزشکی و پزشک روبرو هستند، می‌تواند منجر به انقلابی در بهداشت فردی و اجتماعی گردد.

امروزه افزاره‌های پوشیدنی و کاربست (اپلیکیشن)‌های گوشی‌های هوشمند با ردیابی معیارهایی مانند تعداد قدم‌ها و ضربان نبض کاربر، سلامتی افراد را پیش می‌کنند. اما این اطلاعات در درجه اول برای اهداف اولیه تناسب اندام مفید است. اکنون دستگاه‌ها و نمایشگرهای مچی می‌توانند نظارت پزشکی در زمان واقعی را ارائه دهند که این امر جان انسان‌های زیادی را نجات خواهد داد. برخی از افزاره‌های نوین‌تر، فشار خون را اندازه‌گیری می‌کنند و برخی حتی می‌توانند اسکن ECG (الکتروکاردیوگرام) قلب شما را در کمتر از یک دقیقه انجام دهند. ECG یک ابزار تشخیصی مهم برای تشخیص ناهنجاری‌های عملکرد قلب است که می‌تواند پیش‌آزمون سکته‌های مغزی یا حملات قلبی باشد. تا پیش از این، بیماران فقط می‌توانستند نوار قلب را در مطب پزشک دریافت کنند. اما در حال حاضر، ساخت ساعت‌هایی که می‌تواند سطح گلوکز را برای

کمک به حدود ۷۰۰ میلیون بیمار مبتلا به دیابت در سراسر جهان اندازه‌گیری کند، به یک چالش تبدیل شده است. طبق گزارش‌ها، اپل و سامسونگ هر دو در حال کار بر روی دستگاه‌هایی هستند که می‌توانند به این هدف دست یابند. ساخت این افزاره یکی از جذاب‌ترین دستاوردهای محققان حوزه فوتونیک زیستی بود که در سال ۲۰۲۱ به ثبت رسید. در ماه نوامبر شرکت فرانسوی PKvitality یک آزمایش بالینی انسانی را آغاز کرد که اولین رویکرد عملی برای ساخت ساعت هوشمند پایش قند محسوب می‌شود. این افزاره امکان نظارت پیوسته بر سطح گلوکز سیستمیک را در هر زمان و هر مکان فراهم می‌کند. این امر به لطف SkinTaste، یک آرایه حسگر زیستی ثبت شده که از ریزنقاط خاصی (با طول کمتر از ۱ میلی‌متر) برای تجزیه و تحلیل ترکیبات شیمیایی مایع بینابینی استفاده می‌کند، میسر شده است. بیمار دیابتی می‌تواند سطح گلوکز یا میانگین آن را در محدوده زمانی



ماهنامه فناوری فوتونیک و مواد پیشرفته  
شماره هفدهم اسفند ۱۴۰۰



مشخصی بدون درد بررسی کند. پیشرفت‌های فوتونیک در آینده خواهند توانست تغییرات خارق‌العاده بیشتری را ایجاد کنند. تنها نگرانی موجود این است که انسان چگونه خود را با این پیشرفت‌ها وفق خواهد داد و از ظرفیت بالقوه آن استفاده خواهد کرد. چرا که آگاهی جمعی از ظرفیت‌های دانش و فناوری فوتونیک به خصوص در حوزه‌هایی همچون صنایع تولیدی، کشاورزی، زنجیره غذایی و انرژی، هنوز هم بسیار محدود است. فوتونیک اغلب به عنوان سنگ بنای بسیاری از فناوری‌ها و کاربردهای مختلف شناخته شده و مسئولیت بسیاری از تغییرات سریع در جامعه و حتی بسیاری از ابروندها مانند صنعت چهارم و دیجیتالی شدن را بر عهده دارد. تعداد زیادی از صنایع مانند صنعت خودروسازی، صنایع پزشکی، ساخت تجهیزات مکانیکی و صنعتی و حتی امنیت جاده‌ای از فناوری‌های فوتونیک بهره می‌برند. متخصصان صنعتی پیش‌بینی کرده‌اند که مجموع فناوری‌های فوتونیک به رشد سرمایه‌گذاری سالانه ۷ درصدی خود ادامه داده و تا سال ۲۰۲۳، به رقم خیره‌کننده

۸۰۰ میلیارد دلار برسند. این سرمایه‌گذاری‌های عظیم، مرهون فناوری‌های نوری و فرآیندهای ساخت هوشمند است که منجر به گسترش چشمگیر بازار لیزرها، آشکارسازها، حسگرها و افزاره‌های تصویربرداری ظرف چند سال آینده خواهد شد. بعلاوه، فوتونیک در کنار بازدهی، راحتی و امنیت بیشتر، می‌تواند با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به محافظت از محیط زیست و جلوگیری از تغییر اقلیم کمک نماید. بر طبق گزارش شرکت آلمانی اسپکتاریس، استفاده از فناوری‌های فوتونیک تاکنون توانسته است از انتشار ۱/۱ میلیارد تن گاز دی اکسید کربن به داخل جو زمین جلوگیری کند که این مقدار تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۳ میلیارد تن خواهد رسید. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از یک سو به دلیل افزایش بازدهی نوردهی لامپ‌های دیودی نورگسیل (LED) در مقایسه با لامپ‌های حرارتی و فلوروسنت قدیمی، رخ داده و از سوی دیگر جایگزینی تدریجی منابع انرژی تجدیدپذیر به ویژه انرژی خورشیدی به جای سوخت‌های فسیلی، تحقق این امر را میسر کرده است.



ماهنامه فناوری فوتونیک و مواد پیشرفته  
شماره هفدهم اسفند ۱۴۰۰

بر اساس گزارش‌های متعدد، می‌توان نور را به عنوان کلید توسعه پایدار جهانی بر شمرد و حتی به جای نامگذاری تنها یک سال با نام نور، قرن حاضر را قرن فوتون و نور دانست!



# آموزش کاربردی

نور فشرده چیست

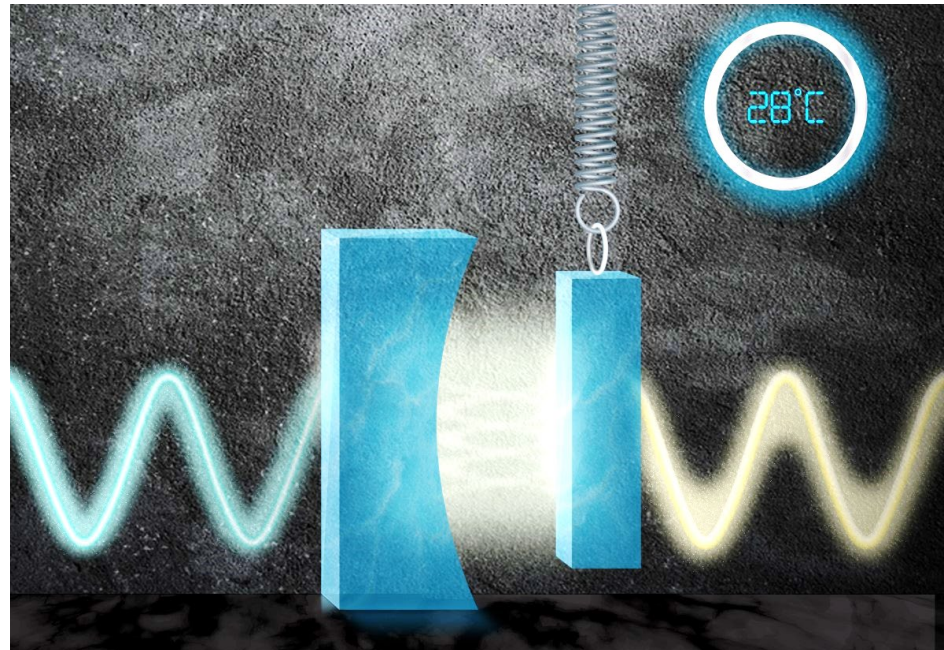
و چگونه تولید می شود؟





## نور فشرده چیست و چگونه

## تولید می‌شود؟



در این بخش قصد داریم شما را با مفهومی موسوم به نور فشرده (Squeezed light) آشنا کنیم. هر چند که این فناوری هنوز به صورت گسترده و همه‌گیر مورد استفاده قرار نگرفته است، با توجه به قابلیت‌های منحصر به فردش می‌توان آینده بی‌بدیلی را برای آن متصور شد. با وجود این که هنوز دانش بهره‌گیری از این نور غیرکلاسیکی چندان گسترش نیافته، مثال‌های فوق‌العاده‌ای از کاربردهای آن وجود دارد. یکی از کاربردهای جالب آن، اندازه‌گیری بسیار دقیق طول برای تشخیص امواج گرانشی توسط تداخل‌سنج‌های بزرگی همچون LIGO Hanford است. این تداخل‌سنج عظیم به فناوری نور فشرده مجهز شده که همین امر حساسیت اندازه‌گیری‌ها را به صورت قابل توجهی افزایش داده و منجر به موفقیت در تشخیص امواج گرانشی در سال ۲۰۱۵ شده است. مثال‌هایی از این دست، توجه علاقمندان به حوزه‌های اپتیک و فوتونیک را به خود جلب کرده و تلاش برای غلبه بر چالش‌های موجود در بهره‌گیری از این فناوری بیش از پیش ادامه

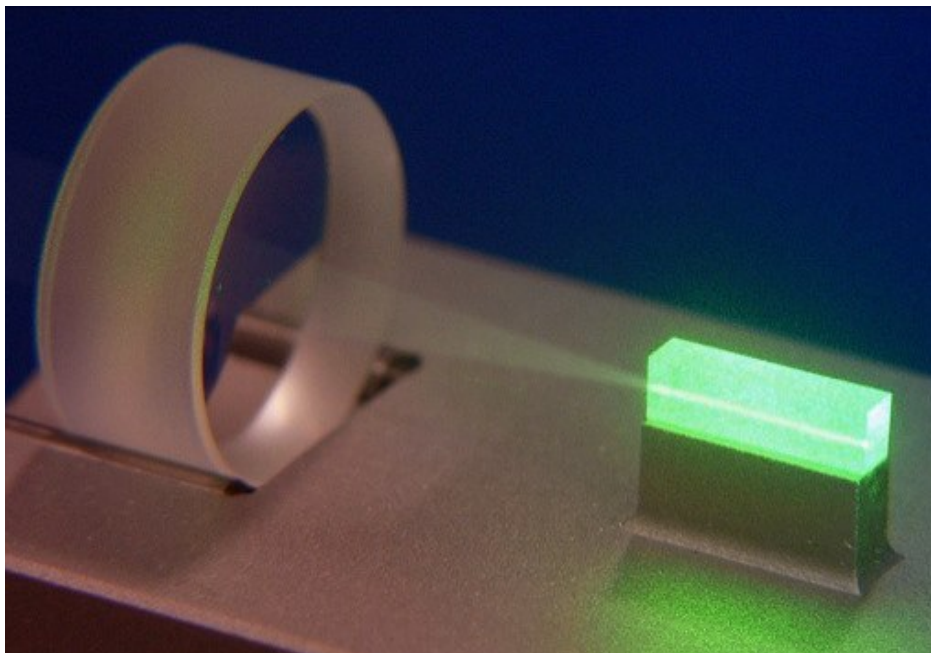
دارد. از این رو، کسب اطلاعاتی هر چند مختصر در این حوزه از جمله دانستن فوتونیک است. بدیهی است در گام اول باید به این سوال پاسخ گفت که نور فشرده چیست و چرا تا این حد جالب توجه می‌نماید؟ اصلاً مگر می‌شود نور را فشرده کرد؟ نور فشرده نوع غیرکلاسیکی نور است که در دهه ۱۹۸۰ برای اولین بار به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. اما نور غیرکلاسیکی چیست؟ نور غیرکلاسیک به نوری اطلاق می‌شود که از مشخصه‌های نویز کوانتومی غیرکلاسیکی برخوردار باشد! روشن است که درک این پدیده تنها از طریق رویکردهای اپتیک کوانتومی میسر می‌شود. در حالی که عملکرد نویز سامانه‌های الکترونیکی اغلب توسط نویز حرارتی محدود می‌شود، اثرات مکانیک کوانتومی هم محدودیت‌هایی را در عملکرد سامانه‌های نوری ایجاد می‌کنند. چرا که با توجه به فرکانس‌های نوری بالا، انرژی فوتون‌ها بسیار بالاتر از انرژی حرارتی  $k_B T$  در دمای اتاق است.

از سوی دیگر، بر اساس مکانیک کوانتومی، میدان الکتریکی یک پرتو نور توسط عملگرهای مکانیکی کوانتومی توصیف می‌شود و اندازه‌گیری‌های نوری تنها حاوی مقادیر مورد انتظار این عملگرها نیستند، بلکه به واسطه نوسانات کوانتومی مقادیر دیگری را نیز در بردارند. به طوری که نویز کوانتومی به صورت‌های زیر در سامانه‌های نوری خود را نشان می‌دهد:

- نویز شدت (shot noise)، نویز فاز و پهنای خط محدود (که حتی در خروجی لیزر تک فرکانسی (فرضی) که در معرض هیچ گونه نویز فنی مانند ارتعاشات آینه نیست، هم دیده می‌شود).
- نویز تقویت‌کننده، نویز اضافی اجتناب‌ناپذیر در تقویت‌کننده‌های نوری
- انتشار خود به خودی اتم‌ها یا یون‌های برانگیخته
- پراکندگی خود به خودی رامان
- فلورسانس پارامتریک
- نویز تفکیکی (Partition noise) که در تقسیم‌کننده‌های پرتو ایجاد می‌شود.

بدین ترتیب، بر اساس آنچه شرح داده شد، نوری که شامل هر یک از نویزهای کوانتومی غیرمعمول بالا باشد، در زمره نورهای غیرکلاسیک قرار می‌گیرد. حال که با مفهوم نویز کوانتومی و نور غیرکلاسیک آشنا شدیم، لازم است قدری هم در مورد گونه‌های مختلف نور غیرکلاسیک اطلاعات کسب کنیم. رایج‌ترین گونه‌های نور غیرکلاسیکی به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

- نور فشرده که در یکی از مولفه‌های مربعی نویز بسیار اندکی دارد. در مرسوم‌ترین گونه موج فشرده، شدت یا فاز نویز به صورت محسوسی کاهش یافته است
- حالت‌های فوک (Fock states) که به آن حالت‌های عدد فوتون هم می‌گویند، تعداد معینی فوتون دربردارد. به عنوان مثال، می‌توان به فوتون‌هایی که درون یک کاواک ذخیره شده‌اند، اشاره کرد. این در حالی است که برخلاف تعداد مشخص فوتون‌ها، فاز به صورت کامل غیرمعیّن است. یک نمونه خاص از این مورد، حالت تک فوتونی است که توسط یک تفنگ تک فوتونی تولید می‌شود.

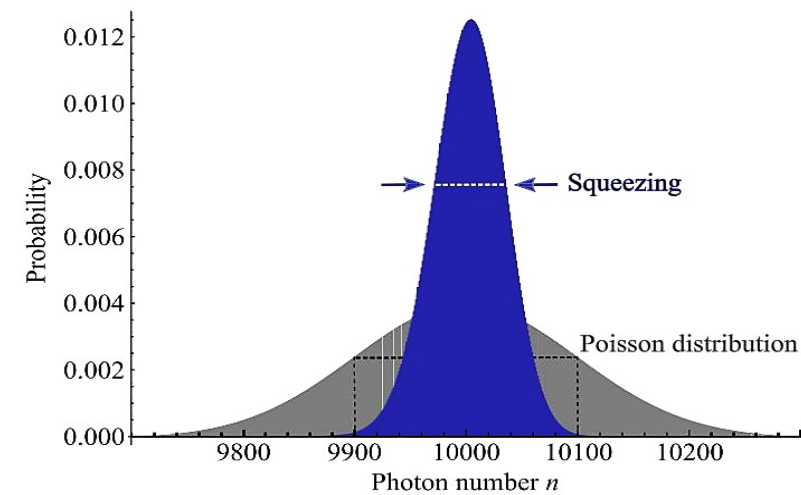


اگر یک نور همدوس به شدت برانگیخته شده باشد، میانگین تعداد فوتون‌ها  $n$  در تمام بازه‌های آشکارسازی زیاد است. در نتیجه می‌توان توزیع پواسونی را با یک توزیع گاوسی با انحراف استاندارد  $\pm\sqrt{n}$  تقریب زد. طی دهه‌های گذشته، حالت فشرده نور توجه زیادی را به خود جلب کرده است. چرا که در مقایسه با نوری در حالت همدوس مشابه با همان میزان برانگیختگی می‌تواند نویز کمتری تولید کند، در واقع این نور از آمار شمارش زیرپواسونی تبعیت می‌کند.

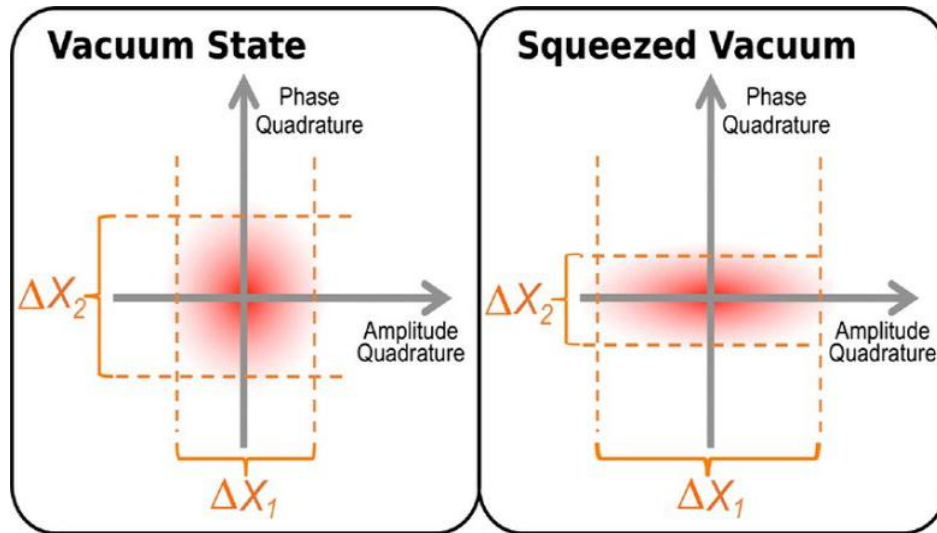


• نور با خاصیت پادخوشه‌گی (antibunching) که احتمال مشاهده دو فوتون در یک بازه زمانی کوتاه با آمار فوتون زیر پواسونی در این نوع نور بسیار اندک است. البته حالت‌های دیگری هم وجود دارد که در آنها بین دو یا چند باریکه مختلف نور همبستگی خاصی وجود دارد. به عنوان مثال، در فرآیند تقویت پارامتریک نور (OPA)، دو فرکانس سیگنال و بیکار (Idler) همبستگی نوین قدرتمندی را نشان می‌دهند. چرا که هر دو نوع فوتون سیگنال/بیکار به صورت جفت تولید می‌شوند. همبستگی غیرکلاسیکی مشابهی در باریکه‌های نوری مختلف هنگام انجام اندازه‌گیری‌های غیرمخرب کوانتومی هم اتفاق می‌افتد. اما حالت‌های همدوس بیشتر به حالت‌های کلاسیک نور شباهت دارند و از آمار فوتونی پواسونی تبعیت می‌کنند. در نتیجه نمی‌توان آنها را به عنوان حالت‌های نور غیرکلاسیکی در نظر گرفت. در واقع حالتی که اغلب در میدان‌های نوری با آن مواجه می‌شویم، حالت همدوس است که توسط EC جورج سودارشان در سال ۱۹۶۰ معرفی شد. این حالت، می‌تواند برای توصیف خروجی یک لیزر تک فرکانس بالای

آستانه لیزر استفاده شود. اما برسیم به مفهوم نور فشرده! کلمه "فشرده" یک اصطلاح فنی در فیزیک کوانتومی است و حالت‌هایی را توصیف می‌کند که عدم قطعیت مکانیکی کوانتومی آنها (در یک محدوده پارامتری معین) کوچکتر از حالت پایه مربوطه است. از این رو، بررسی مفهومی "عدم قطعیت" کلید حل معمای پیش روی ماست! همانطور که می‌دانید، حالت پایه هیچ حالت تحریک کوانتومی ندارد. در واقع "حالت پایه" یا "حالت خلا" به کم انرژی‌ترین حالت یک نوسانگر هماهنگ گفته می‌شود که بر اساس اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، کمینه عدم قطعیت هم مربوط به همین حالت است. با توجه به مشخصه‌های حالت پایه، اندازه‌گیری عدم قطعیت بین دو متغیر در این حالت توزیع یکسانی دارد. اما دستیابی به عدم قطعیتی کمتر از حالت پایه چطور ممکن است؟ اگرچه اصل عدم قطعیت برای حاصلضرب عدم قطعیت در جفت‌های مشاهده‌پذیر یک مقدار حداقلی را در نظر می‌گیرد، اما محدودیتی برای عدم قطعیت هیچ یک از مشاهده‌پذیرها به تنهایی ایجاد نمی‌کند. شناخته‌شده‌ترین رابطه عدم قطعیت، یک محدودیت حداقلی را بر حاصلضرب عدم قطعیت‌ها (مشخص شده



شکل زیر آمار فوتون پواسونی و فشرده را نشان می‌دهد. مرز بالایی هر ناحیه نشان‌دهنده توزیع احتمال تعداد فوتون‌های شناسایی شده  $n$  است. مقدار  $n$  از اندازه‌گیری بر روی مجموعه‌ای از حالت‌های یکسان با تعداد متوسط فوتون‌ها به دست می‌آید که برابرست با  $n = |\alpha|^2 = 10000$  در این رابطه  $\alpha$  برانگیختگی میدان همدوس یا جابه‌جایی است. منحنی وسیع‌تر توزیع پواسونی را نشان می‌دهد که آمار شمارش ذرات مستقل، مانند حالت همدوس را توصیف می‌کند. منحنی باریک‌تر به حالت فشرده‌ای که به اندازه ۱۰ دسی بل جابه‌جا شده، مربوط است و مشخص است که از آمار فوتون زیر-پواسونی پیروی می‌کند.



توسط  $\Delta$  در موقعیت  $x$  و تکانه  $p$  اعمال می‌کند، یعنی  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$ . در واقع، روابط عدم قطعیت جنبه‌ای از مکانیک کوانتومی است که به طرز جالبی غیرکلاسیک است. به عنوان مثال، اگر یک ذره در یک مکان بسیار خاص وجود داشته باشد، تکانه آن باید بسیار نامشخص باشد و بالعکس. حالت‌های فشرده هم گونه‌ای از حالات کوانتومی هستند که نمونه‌ای از آن نوع رفتار را از خود نشان می‌دهند، با عدم قطعیت کوچک در یک مورد مشاهده‌پذیر و عدم قطعیتی بزرگ در دیگری!

به طور کلی دو نوع مشاهده‌پذیر مختلف وجود دارد که می‌توان آنها را در یک سامانه کوانتومی مورد سنجش قرار داد. نوع اول با خاصیت موجی سامانه مرتبط است. به عنوان مثال، در اپتیک، با شدت میدان الکتریکی در یک زاویه فاز معین  $\theta$  مطابقت دارد. دیگری، عملگرهای بدون بعدی هستند که دامنه‌های مربعی (quadrature amplitudes) نامیده می‌شوند و دارای طیف پیوسته‌ای از مقادیر ویژه هستند.

برای درک بهتر، ابتدا تابع موج یک حالت نوری را در فضاهای مکان و تکانه،  $\Phi(x)$  و  $\Phi(p)$  در نظر بگیرید که در آن  $x$  و  $p$  با ربع‌های فاز و دامنه نور مطابقت دارند. قدر مطلق مربعات این توابع لبه‌های تابع ویگنر حالت توزیع‌های

احتمال را برای مربعات دامنه و فاز نشان می‌دهند. برای حالت‌های خلا و همدوس، دو تابع موج به صورت تابع گاوسی متقارن چرخشی با عرض‌های یکسان هستند، بدین معنی که تغییرات مربوط به اندازه‌گیری هر ربع یکسان است و اغلب هنجار به واحد می‌شود، به طوری که:  $V(x) = V(p) = 1$ .

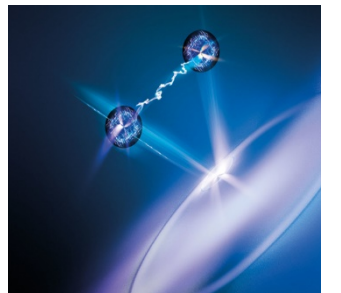
این حالت‌ها را می‌توان در فضای فاز با به تصویر کشیدن مقاطع توابع ویگنر مربوطه آنها، نشان داد. برای حالت‌های گاوسی، شرط حداقل حاصلضرب به این معنی است که مساحت یک حالت باید حداقل به اندازه مساحت حالت پایه باشد.

با این حال، یک حالت را می‌توان به گونه‌ای فشرده کرد که عدم قطعیت در یک کمیت مشاهده‌پذیر کاهش یابد، مشروط بر اینکه عدم قطعیت متغیر مزدوج به اندازه‌ای بزرگ شود که مساحت را حفظ کرده یا افزایش دهد. در این حالت، تغییر یکی از دامنه‌های مربعات کمتر از تغییر حالت خلا یا همدوس است (به عنوان مثال  $V(x) < 1$ ). این به معنای بالاتر بودن تغییر مربعات مزدوج از حالت خلا است (به عنوان مثال  $V(p) > 1$ ) که این امر به خاطر تبعیت از رابطه عدم قطعیت هایزنبرگ صورت می‌گیرد. دامنه‌های مربعی به صورت تجربی با تقریب

در مورد نور، حالت‌های فشرده، عدم قطعیت فشرده‌ای از قدرت میدان الکتریکی را نشان می‌دهند. مانند هر نوسانگر کوانتیزه شده، نوسان قدرت میدان با دو کمیت غیر قابل تغییر توصیف می‌شود، که در اینجا دامنه مربعات دامنه با  $(X1)$  و دامنه مربعات فاز با  $(X2)$  نشان داده شده‌اند. بر اساس اصل عدم قطعیت هایزنبرگ روند کلی چنین است: وقتی  $X1$  فشرده می‌شود،  $X2$  باید حداقل به همان شدت "غیر فشرده" شود! شکل بالا سمت چپ یک حالت خلا کلاسیک با توزیع احتمال دایره‌ای را نشان می‌دهد. اما شکل سمت راست، یک حالت خلا فشرده را به تصویر کشیده است که می‌تواند برای کاهش نویز در یک دامنه مربعی بازخوانی استفاده شود. در حالی که نویز در دامنه مربعی دیگر کاهش می‌یابد.







نوسانات خلا در هر جایی، حتی در مکان‌هایی در دنیای کلاسیک که به طور کامل هم تاریک است، وجود دارد. این افت و خیزها ممکن است با هر نوسان، قطبش و جهت انتشاری وجود داشته باشند. انرژی و قدرت میدان این اختلالات هر چند بسیار کوچک است اما با نتایج فیزیکی مهمی همراه است که گسیل خودبه‌خودی و نیروهای کاسیمیر از آن جمله‌اند. این پیامدها دقت اندازه‌گیری‌های حساس را با محدودیت مواجه می‌کنند.

بسیار خوبی توسط یک آشکارساز هموداین و با استفاده از تداخل با یک پرتو نوسانگر محلی روشن، اندازه‌گیری می‌شوند. از لحاظ نظری، نور فشرده با در نظر گرفتن فازهای مختلط برای نمایش حالات نور در یک حالت میدان نوری قابل درک است.

از منظر کلاسیکی، چنین حالتی را می‌توان به کمک یک فازور خاص (نقطه پایانی در صفحه مختلط) نشان داد. اما در اپتیک کوانتومی، با توجه به عدم قطعیت کوانتومی، اندازه‌گیری دامنه مختلط میدان نوری می‌تواند مقادیر متفاوتی را در محدوده مشخصی از عدم قطعیت نتیجه دهد.

حالت همدوس حالت خاصی از حالت‌های کمینه عدم قطعیت است که در آن عدم قطعیت به طور مساوی بین دو ربع توزیع می‌شود.

در مقابل، همانطور که دیدید، عدم قطعیت یکی از مربعات در یک حالت فشرده می‌تواند در برابر افزایش عدم قطعیت ربع دیگر، به طور دلخواه کوچک شود.

در واقع کنترل‌ناپذیری کلاسیکی عدم قطعیت

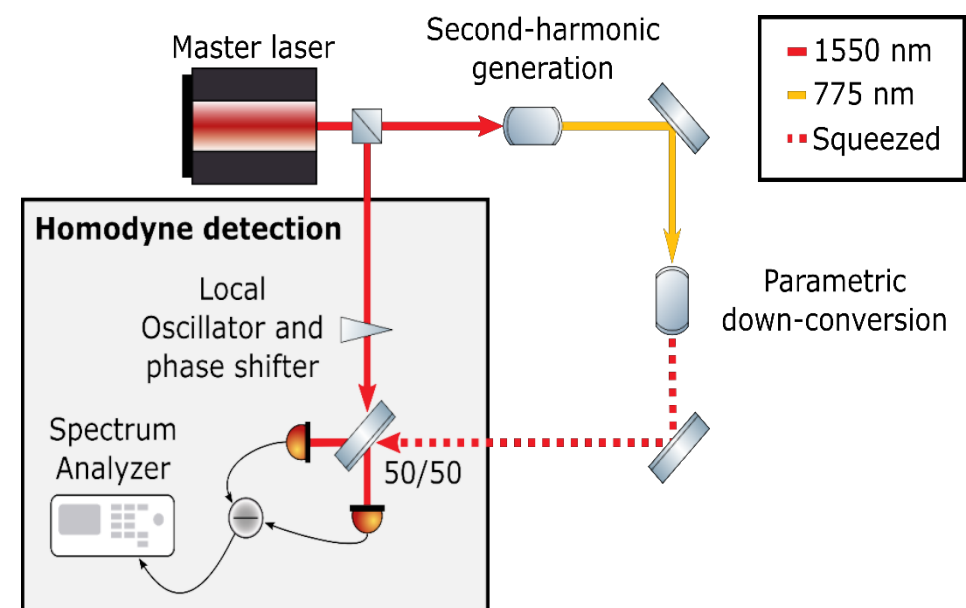
مربعات میدان نوری، به صورت چشمگیری فرآیندهای حسگری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این کنترل غیرقابل دسترس کلاسیک بر عدم قطعیت مربعات میدان نوری، پیامدهای معینی برای سنجش دارد.

فشردن نه تنها نسبت سیگنال به نویز (SNR) بالاتری را نتیجه می‌دهد، بلکه با این روش می‌توان سیگنال‌هایی را شناسایی کرد که امکان تشخیصشان در در حسگرهای کلاسیک مشابه وجود ندارد.

حساسیت حسگری را که ربع‌های فاز یا دامنه (یا ترکیبات خطی آنها) میدان نوری آن مدوله شده، می‌توان با فشردن مربعات دامنه یا فاز (یا ترکیب خطی مناسب) افزایش داد.

حال که با مفهوم فیزیکی نور فشرده آشنا شدیم، در قدم بعدی به بررسی برخی از روش‌های عملی تولید آن می‌پردازیم.

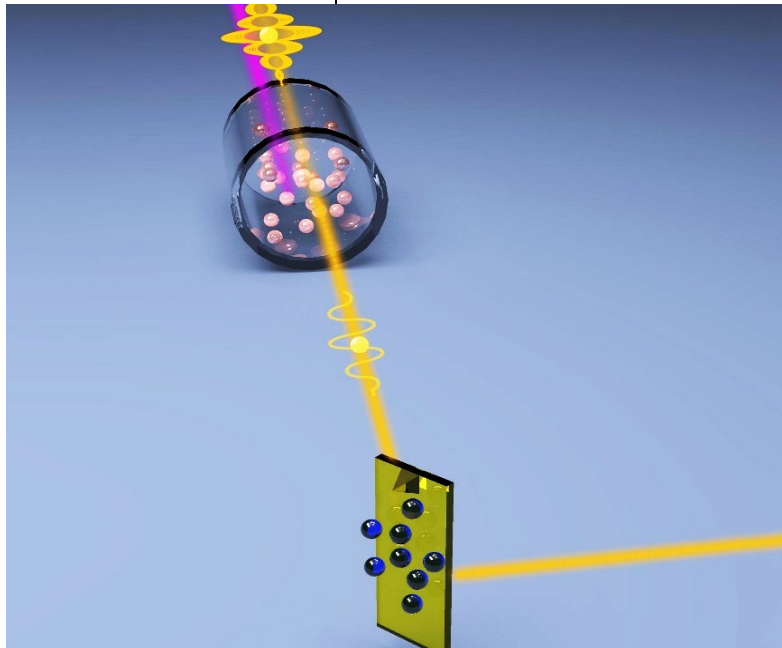
به طور کلی، نور غیرکلاسیک اغلب توسط دستگاه‌های غیرخطی مانند نوسانگرهای پارامتری نوری زیرآستانه، دو برابرکننده‌های فرکانسی و سامانه‌هایی متشکل از تنها یک اتم یا یون (که شامل تعداد اندکی گسیلنده هستند) تولید می‌شوند.



سامانه‌هایی شبیه به لیزرهای تک اتمی از آن جمله هستند. میدان‌های نوری، در یک محیط خاص می‌توانند به گونه‌ای برهم‌کنش کنند که منجر به فشرده‌گی شوند. این محیط‌ها با یک مولفه غیرخطی مانند  $K$  مشخص می‌شوند که تعیین‌کننده قدرت فشرده‌گی پس از مدتی برهم‌کنش در محیط است.

اولین بار در سال ۱۹۸۵ بود که اسلاشر و همکارانش موفق شدند با استفاده از اختلاط چهار موج در اتم‌های سدیم درون یک کاواک نوری، نور فشرده را تولید کنند. کمی بعد از آن با استفاده از همین روش اما این بار درون یک فیبر نوری به جای کاواک، نور فشرده ایجاد شد. در همان زمان، رویکرد دیگری هم برای تولید نور فشرده ابداع شد که در آن از تبدیل پایین پارامتری (PDC) در یک کریستال غیرخطی مرتبه دوم (که درون یک کاواک نوری قرار داده شده بود)، بهره گرفته شد. کاواک پمپ شده درست در زیر حالت آستانه‌اش کار می‌کرد، یعنی حالتی که بهره پارامتری نمی‌توانست اتلاف در هر چرخه را به طور کامل جبران کند. این حالت را تقویت نوری پارامتری (OPA) افزایش یافته کاواک می‌نامند.

در آن زمان‌ها، فاکتورهای فشرده‌گی از چند درصد تا حدود ۳ دسی‌بل به دست آمد. در حالی که امروزه فاکتورهای فشرده‌گی بیش از ۱۰ دسی‌بل به صورت مستقیم از طریق چندین روش تجربی به ثبت رسیده است که البته همه آنها بر اساس OPA در زیر حالت آستانه، انجام شده است. حالت تقویت شده به صورت پارامتری، تبه‌گن است. چرا که حالت‌های سیگنال و Idler یکسان هستند. در این شرایط، فرآیند تبدیل پایین (Down-conversion)، به صورتی اتفاق می‌افتد که دو میدان خروجی، حالت درهم تنیده خواهند داشت و حالت تقویت شده قطبش معینی دارد. حالت‌های فشرده حتی در بالای آستانه نوسان هم می‌توانند تولید شوند. در سال ۲۰۰۶ محققان



موفق شدند از شرایط بالای آستانه نوسان برای فرآیند تبدیل پایین پارامتری با موج پیوسته بهره‌برند و نوری فشرده با دو پارامتر تولید کنند. فرآیند تبدیل پارامتری بالا (UP-conversion parametric)، با دو برابر کردن فرکانس پرتو ورودی یکی دیگر از رویکردهای مناسب برای تولید نور فشرده است. این فرآیند، معکوس فرآیند تبدیل پایین است.

فشرده‌سازی در فیبرهای نوری هم به واسطه اختلاط چهار موجی و اثر کر نوری غیرخطی اتفاق می‌افتد. در واقع، اثر کر می‌تواند یک حالت همدوس را از لیزر پمپ به حالت فشرده تبدیل کند. اما در تحقیقات اخیر، یک مولکول فوتونیک متشکل از دو تشدیدکننده ریز حلقه‌ای جفت شده بر روی یک تراشه مجتمع، برای تولید نور فشرده و فاقد نویز ناشی از فرآیندهای غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته است. رویکرد هوشمندانه استفاده از تشدیدکننده‌های میکروحلقه‌ای روش نوین جالب توجهی برای تولید نور فشرده تبه‌گن است. زیرا ساختارهای تک تشدیدگر ساده نمی‌توانند بدون کاهش بازده توان پمپ، نویز غیرخطی را از بین ببرند.

امروزه روش‌های متعددی برای تولید نور فشرده ابداع شده است که در این بین بهره‌گیری از ویژگی‌های غیرخطی نانومواد از محبوبیت خاصی برخوردار است. در هر حال، دستاوردها و روش‌های خلاقانه‌ای که در سال‌های اخیر توسط دانشمندان فعال در این حوزه معرفی شده است، ما را به سمت درک عمیق‌تر و مطالعه دقیق‌تر پدیده‌های نوری چه در فضاهای بین‌کاهش و چه در فضاهای بین اتمی سوق می‌دهند.



# نانوفوتونیک، دنیای پنهان فناوری

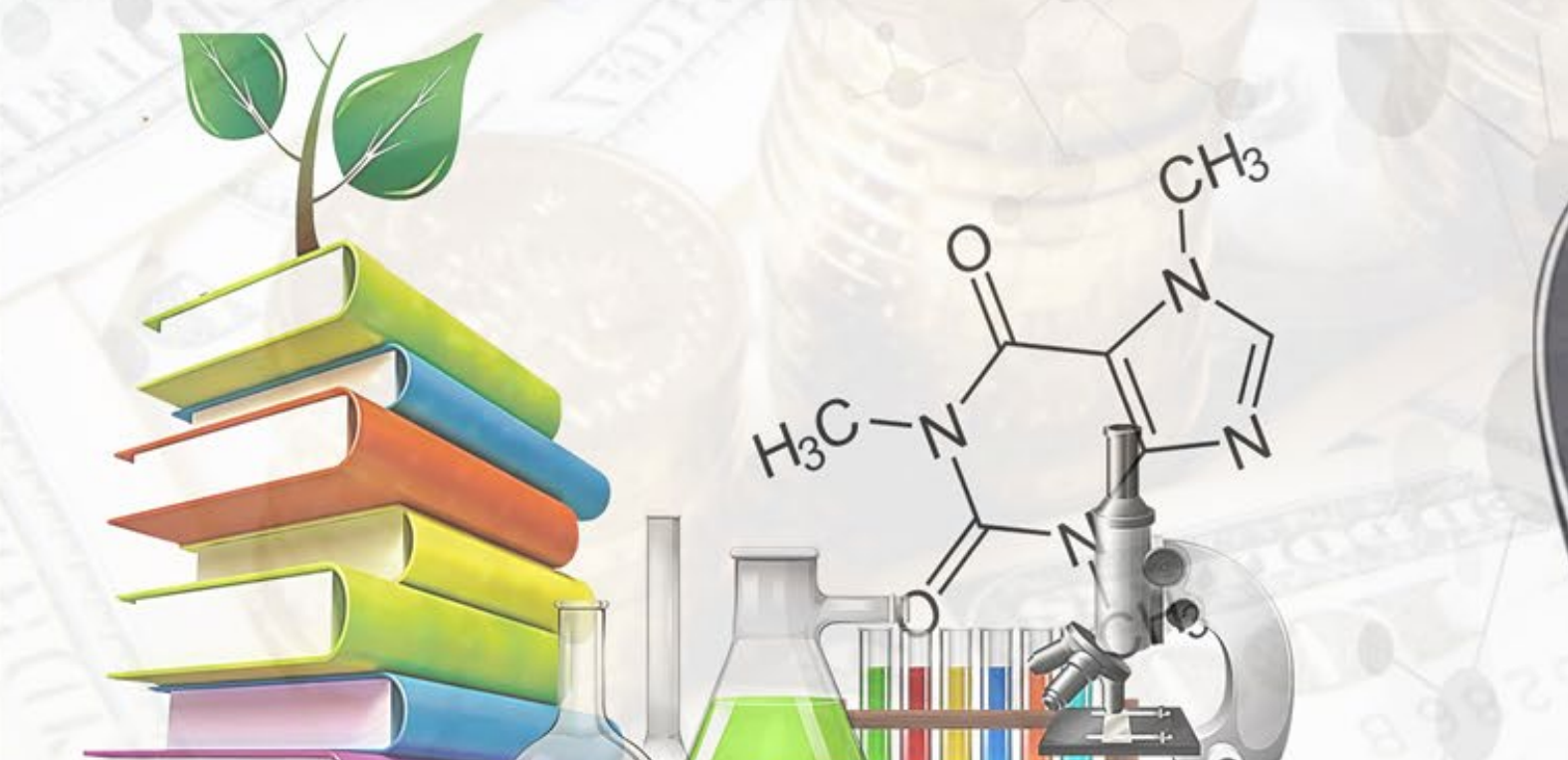
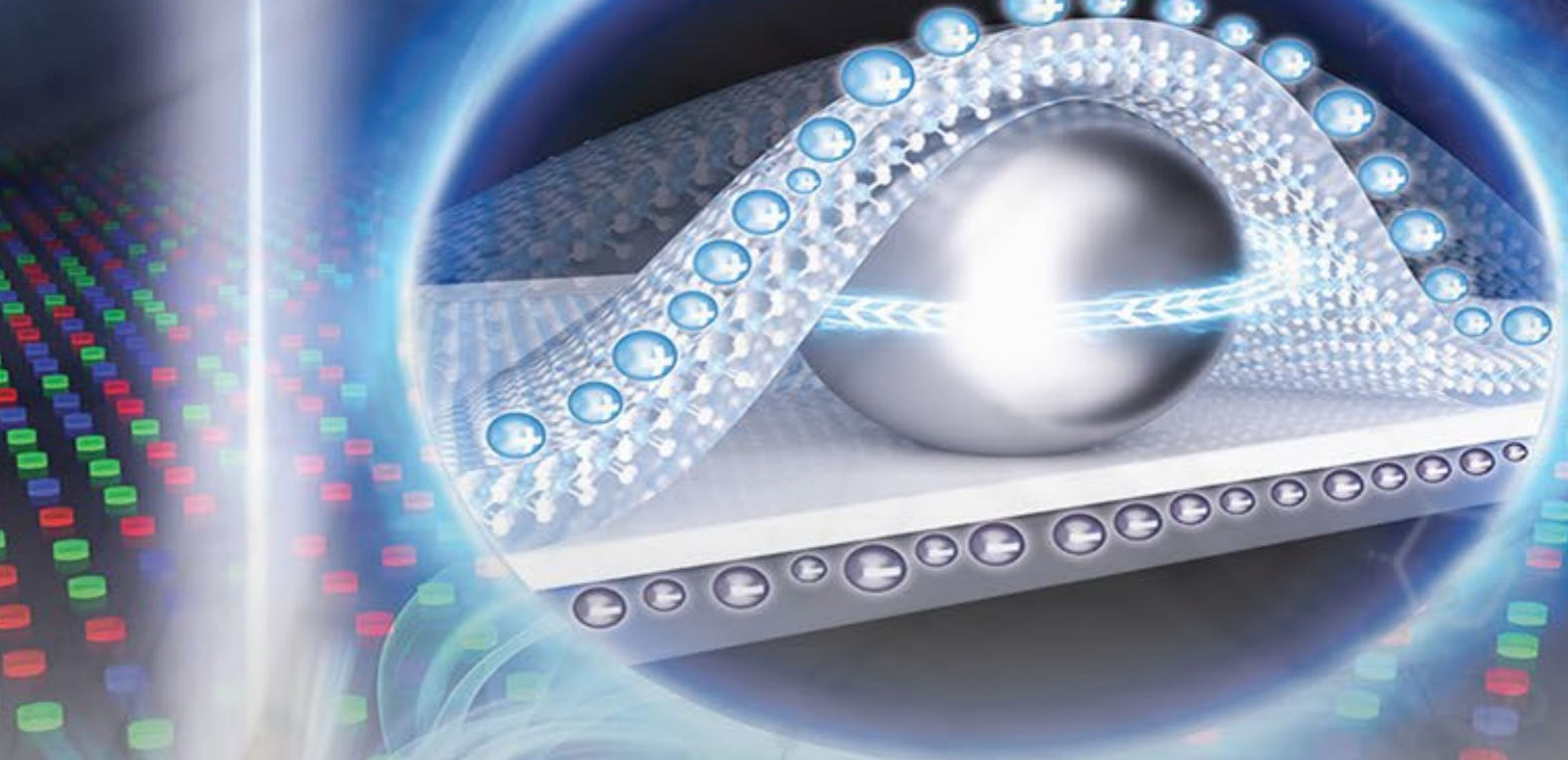
معرفی شرکت دانش بنیان آرمان جستجوگران انرژی نور

فعال در زمینه نانوفوتونیک و نانومواد

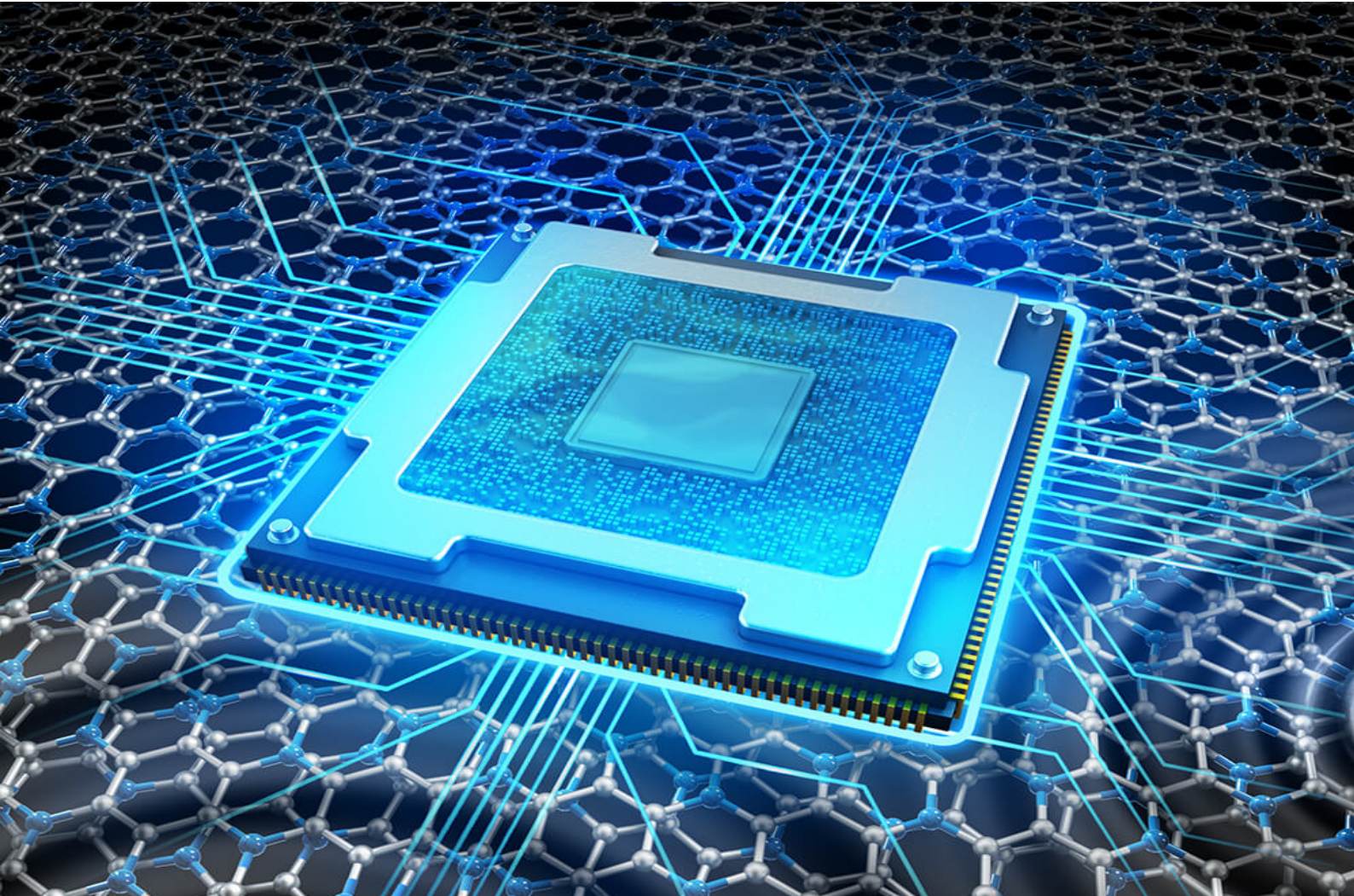
# نور، ابزار مشاهده آنچه نمی بینیم!

معرفی شرکت دانش بنیان فتح نور مبین

فعال در زمینه تجهیزات سنجش نوری







## نانوفوتونیک، دنیای پنهان فناوری



### معرفی شرکت دانش بنیان آرمان جستجوگران انرژی نور

در عصر حاضر، برای پیشبرد اهداف فناوری‌های نوین و دستیابی به تقاضای بازارها، ادغام فناوری‌های مختلف می‌تواند راهگشای بسیاری از چالش‌های موجود باشد. تغییر سبک زندگی در تمام دنیا به سرعت و پیوسته در حال وقوع است و به نظر می‌رسد تنها فناوران و دانشمندان هستند که می‌توانند راهکارهایی متناسب با این تغییرات، ارائه دهند. از این رو، در سال‌های اخیر شاهد ظهور فناوری‌های متعددی بوده‌ایم که اغلب از تلفیق چندین دانش مختلف به دست آمده‌اند. فناوری فوتونیک و ترکیب آن با فناوری نانو یکی از مهم‌ترین مواردی است که اثر آن به وضوح در زندگی ما مشهود است. بازار فناوری نانوفوتونیک چنان گسترده است که بدون آن دیگر نمی‌توان زندگی کرد. کاربردهای متنوعی همچون الکترونیک و مخابرات نوری، زیستی

و پزشکی، تولید و ذخیره انرژی، حمل و نقل، هوافضا، تجهیزات دفاعی و نظامی و بسیاری از کاربردهای مشابه دیگر، بر پایه نانوفوتونیک استوار هستند. یکی از بخش‌های گسترده بازار فناوری نانوفوتونیک مربوط به حسگرهای نوری و منابع نوری کم‌مصرف مانند دیودهای نور گسیل یا LEDها است. در واقع این دو بخش سهم عظیمی را در بازار جهانی به خود اختصاص داده‌اند و علت آن نیز وسعت کاربردهایشان در بطن زندگی مردم است. بنابراین، افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه فناوری نانوفوتونیک، بازار آن را بیش از پیش شکوفا خواهد کرد. تحقیقات در زمینه توسعه فناوری‌های حسگری و منابع نوری مبتنی بر نانوفوتونیک، با یک هدف

مهم و مشترک در میان همه فناوران و تولیدکنندگان دنبال می‌شود، یعنی کاهش هزینه تولید و ارتقاء کارایی محصولات! البته چنین هدفی را برای بسیاری از فناوری‌ها نیز می‌توان متصور بود، اما در حوزه نانوفوتونیک به دلیل اساسی بودن آن و کاربردهای متنوعش، از اهمیت بالاتری برخوردار است. تقاضا برای محصولات مبتنی بر نانوفوتونیک در سال‌های آینده افزایش چشمگیری خواهد داشت. با این حال، عدم آگاهی از افق بلندمدت و هزینه بالای توسعه، با روند رو به رشد بازار مقابله می‌کند؛ همان چالش‌هایی که در ایران نیز به شدت با آن مواجه هستیم. اگرچه بسیاری از محصولات مبتنی بر فناوری نانوفوتونیک در داخل کشور تولید می‌شوند، اما بسیاری از قطعات و ادوات اصلی آن‌ها مانند حسگرهای نوری، از خارج کشور تأمین می‌شود. بخش عمده این مشکل ناشی از عدم وجود فناوری و تجهیزات لازم جهت تولید مواد اولیه و مهندسی آن‌ها است.

این در حالی است که دانش و نیروی انسانی متخصص در این حوزه در کشور وجود دارد. سرمایه‌گذاری در بخش تولید نانومواد با خواص نوری و الکترونیکی مختلف، علاوه بر توسعه حسگرها و منابع حالت جامد نوری، در سایر زمینه‌ها نیز می‌تواند کارایی ویژه‌ای داشته باشد. یکی از شرکت‌های دانش‌بنیان موفق در این زمینه، شرکت «آرمان جستجوگران انرژی نور» است که در سال ۱۳۹۳ در تبریز فعالیت خود را آغاز کرده است. این شرکت توسط گروهی از اعضای هیأت علمی دانشگاه و صنعتگران، که تجربیات انحصاری و زیادی در حوزه نانوفوتونیک در سطح کشور دارند، تأسیس شده است. هدف اصلی این شرکت، فعالیت در زمینه مهندسی فوتونیک و الکترونیک با استفاده از دست‌آوردهای مهم در فناوری نانو، جهت تولید قطعات و سامانه‌های مبتنی بر فناوری نانوفوتونیک است. این محصولات با نام تجاری «ASEPE» به بازار عرضه شده‌اند.

به قلم علی کاظم پور  
kazempoorali.a@gmail.com

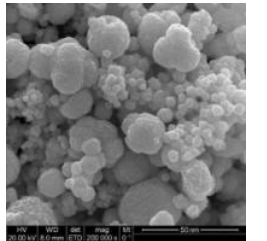


ماهنامه فناوری فوتونیک و مواد پیشرفته  
شماره هفدهم اسفند ۱۴۰۰



ماهنامه فناوری فوتونیک و مواد پیشرفته  
شماره هفدهم اسفند ۱۴۰۰





از جمله نانوپودرهای تولید شده در شرکت آرمان جستجوگران انرژی نور، می توان به نانوپودرهای طلا، نقره، اکسید تیتانیوم و اکسید روی در مقیاس صنعتی اشاره کرد که در موارد مختلف صنعتی و بهداشتی به کار گرفته شده اند.

اولین محصول تولیدی این شرکت، آشکارسازهای مادون قرمز نزدیک میانی و دور مبتنی بر نقاط کوانتومی بود که در سال ۱۳۹۴ تولید شد. آشکارساز مادون قرمز میانی (۳ تا ۵ میکرومتر) این شرکت (AMIRPD-001)، دارای نرخ نمونه برداری ۱۰ میلیون بر ثانیه است. صفحات روشن، سلولهای خورشیدی، نورپردازی تابلوهای ترافیک و دوربین حرارتی مادون قرمز از دیگر خدمات و محصولات این شرکت در حوزه نانوفوتونیک است. از بخش های عمده دیگر فعالیت شرکت آرمان جستجوگران انرژی نور می توان دو بخش نانوالکترونیک و نانومواد را نام برد. در حوزه

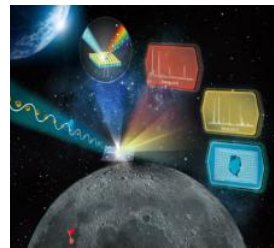
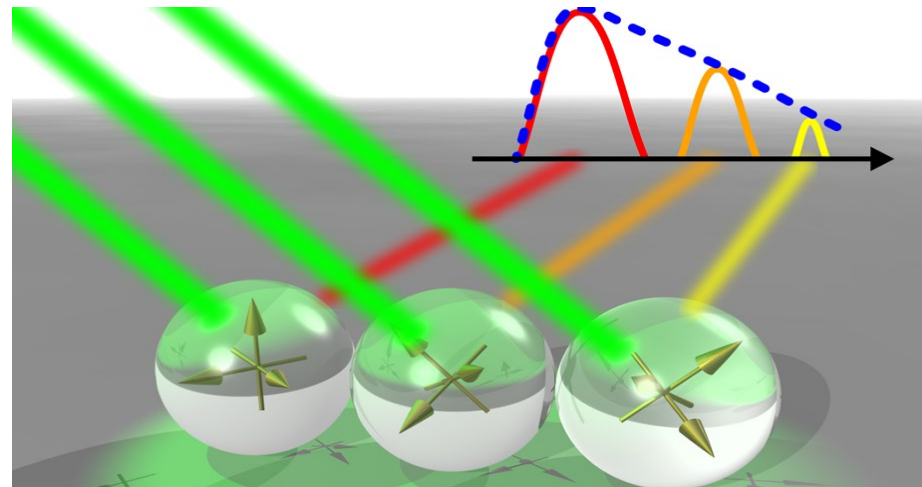


نانوالکترونیک، محصولاتی که در داخل کشور بدون نیاز به تجهیزات پیشرفته قابل تولید باشد، توسط این شرکت ساخته شده و به بازار ارائه می شود. از جمله این محصولات می توان به حسگرهای گاز مبتنی بر نانومواد اشاره نمود که حسگرهای گاز منواکسید کربن و سولفید هیدروژن از این دسته به شمار می روند. در بخش نانومواد نیز تاکنون بیش از ۳۰ نوع ماده مهم فلزی و غیرفلزی در قالب پودر، ژل و کلوئید، در این شرکت تولید شده است که در حوزه های مختلف بهداشتی، پزشکی و صنایع نفت و پتروشیمی، تصفیه آب، بسته بندی، کشاورزی و دارویی کاربرد دارد.



که انواع روش های طیف سنجی و تداخل سنجی از مهم ترین این روش ها به شمار می آیند. طیف سنجی، روشی برای درک مولکول ها بر اساس تحلیل برهم کنش های نور و ماده است. با تجزیه و تحلیل مقدار نور جذب شده، ساطع شده و یا تداخل امواج نوری عبوری از یک نمونه، می توان اجزاء و ویژگی های نمونه را تعیین کرد. این ابزارها در تحقیقات پایه علوم مختلف بسیار پرکاربرد و ضروری هستند. اما در علوم کاربردی از جمله صنایع شیمیایی، پتروشیمی، پزشکی و محیط زیست، دارویی، غذایی و کشاورزی، فلزات و معدن و آب نیز از این ابزارها به وفور استفاده می شود.

به طور معمول، ما جهان فیزیکی را به شیوه ای ساده می نگریم و چیزهایی که نمی توانیم به طور مستقیم با چشم ببینیم را به ناچار می پذیریم. اما دانشمندان و محققان کنجکاوتر از افراد معمولی هستند. آن ها تشنه درک طبیعت محیط اطراف هستند. دنیای بی انتهای پیشرفت علم و فناوری مرهون همین کنجکاوی ها است. یکی از راه های پر کردن شکاف های موجود در علوم و فناوری های مختلف، شناخت و سنجش به کمک نور است. این شناخت می تواند در بعد ظاهری مواد و اشیا باشد و یا فراتر از آن، که برای درک آن باید به دنیای اجزای سازنده مواد سفر کنیم. راهکارهای سنجش نوری بسیار متنوعی هستند



سنجش نوری اکنون فرازمینی نیز شده است و بسیاری از یافته های فضایی در مورد ستارگان و کهکشان ها با روش های سنجش نوری از جمله طیف سنجی به دست آمده است.



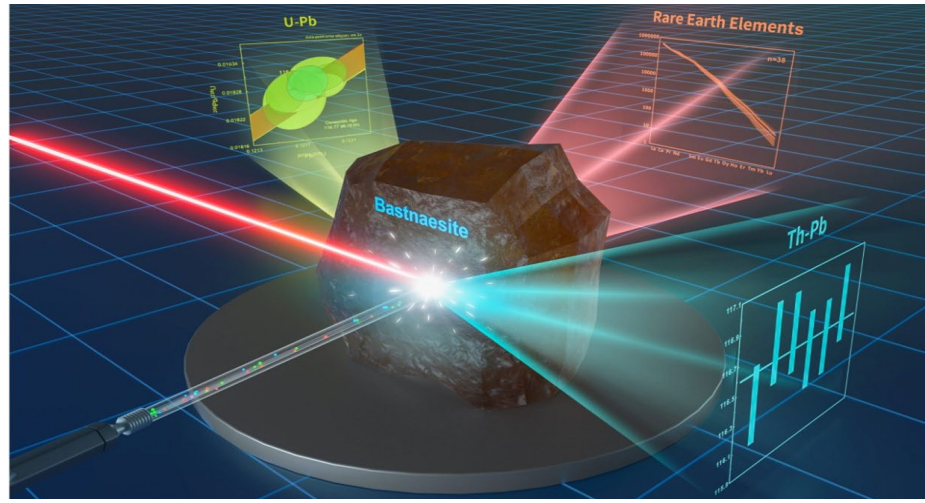


فناوری‌های نام برده شده با گستردگی و کارایی بالایی که در همه حوزه‌های صنعتی و غیر صنعتی دارند، یک منبع مهم جهت رشد و توسعه اقتصادی، صنعتی و علمی هستند. در طی ۳ سال اخیر، رشد بازار فناوری طیف‌سنجی بیش از ۳ میلیارد دلار در کل جهان بوده است.



مزایای فناوری طیف‌سنجی و تداخل‌سنجی بسیار فراوان است. تداخل‌سنجی ابزار قدرتمندی است که اغلب برای اندازه‌گیری سطوح با کاربردهای زیادی در صنایعی مانند ساخت نوری، ذخیره‌سازی داده‌ها، شناسایی خواص نوری مواد، سنجش از راه دور و تصویربرداری استفاده می‌شود. سال‌هاست که برای بررسی ریزساختار سطح از تداخل‌سنجی‌ها در چیدمان میکروسکوپ‌ها بهره گرفته می‌شود. رویکردهای تداخل‌سنجی مختلفی همچون تغییر فاز، روشی سریع و بسیار دقیق برای وارد کردن داده‌های تداخلی به رایانه ارائه کرده‌اند و نویز ذاتی در فرآیند تولید داده‌ها آنقدر کم است که در یک محیط خوب می‌توان اندازه‌گیری ارتفاع یا ضخامت سطح با دقت آنگستروم یا زیر آنگستروم را انجام داد. فناوری‌های سنجش نوری در ایران نیز جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است که نیازمند حمایت و رشد بیشتری است. در حال حاضر، انواع مختلف روش‌های سنجش نوری در دنیا استفاده می‌شود که فناوری ساخت همه آن‌ها در کشور به شکل تجاری وجود ندارد. با این حال، در چندسال اخیر شاهد رشد قابل توجه این فناوری‌ها در کشور بودیم که شرکت‌های دانش بنیان سهم مهمی در این پیشرفت داشته‌اند.

شرکت «فتح نور میهن» با نام تجاری «فتح اپتیک»، یکی از این شرکت‌ها است که در زمینه سنجش نوری شامل طیف‌سنجی، تداخل‌سنجی و تولید منابع نوری و ملزومات مورد نیاز این فناوری فعالیت می‌کند. این شرکت دانش‌بنیان در سال ۱۳۹۱ با همکاری جمعی از اعضای هیأت علمی در پارک علم و فناوری دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان تأسیس شد. هدف این شرکت، تولید محصولاتی بر پایه دانش و تجربه متخصصان داخل کشور است. این هدف شامل طراحی و ساخت انواع تجهیزات نوری، اپتومکانیکی و ارائه راهکارهای کارآمد مبتنی بر نور است. این شرکت با بومی‌سازی فناوری‌های موجود در جهان و پیاده‌سازی ایده‌های جدید در زمینه اپتیک، سعی دارد کاستی‌های موجود در این حوزه را در ایران برطرف سازد. در همین راستا مجموعه شرکت فتح نور میهن با تکیه بر توانایی علمی و خلاقیت نیروی انسانی متخصص، پس از اتمام مرحله دانش بنیان نوپا، در سال ۱۳۹۹ موفق به کسب مجوز دانش‌بنیان تولیدی در حوزه فناوری ماشین‌آلات و تجهیزات پیشرفته از معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری شده است. این شرکت در مدت فعالیت خود، تلاش نموده است محصولات خود را با کیفیت رقابتی و خدمات پس از فروش

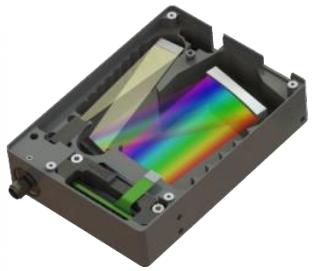


مطلوب به دست اساتید، محققان در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی و دیگر مخاطبان در صنایع مربوطه برساند و رضایت ایشان در این سال‌ها گواهی بر این ادعاست. یکی از ویژگی‌های شرکت فتح نور میهن، ارائه راهکارها و راه‌حل‌ها جهت رفع چالش‌های موجود در تحقیقات و صنایع مرتبط است. استفاده از روش‌های مبتنی بر نور، ابزار قدرتمندی است که فناوران این شرکت به خوبی آن را جهت رفع نیازهای مشتریان به کار گرفته‌اند. ابزارهای سنجش دقیق مبتنی بر نور، پیاده‌سازی راهکارهای بینایی ماشینی برای اتوماسیون و افزایش دقت و سرعت، پیاده‌سازی الگوریتم‌های تحلیل تصویر و استخراج داده و همچنین اندازه‌گیری غلظت و شناسایی محلول‌ها و گازها، از مهم‌ترین خدماتی است که این شرکت دانش‌بنیان ارائه می‌دهد. در ادامه با چند محصول این شرکت آشنا می‌شویم.

### طیف‌سنج‌هاک آرایه‌اک

شرکت دانش‌بنیان فتح نور میهن با توجه به نیاز بخش‌های مختلف تحقیقاتی، آموزشی، آزمایشگاهی و صنعتی، اقدام به طراحی و ساخت طیف‌سنج‌هایی با کیفیت و قیمت قابل رقابت با نمونه‌های مشابه خارجی کرده است. استفاده از فیبر نوری در این دستگاه، این امکان

را فراهم می‌کند تا بدون نیاز به جابه‌جا کردن آن، نور ورودی از منبع مورد نظر و نور محیط یا نور بازتاب شده از اجسام بدون کاهش کیفیت به داخل طیف‌سنج هدایت شود. طیف‌سنج‌های ساخته شده توسط این شرکت، از نوع آرایه‌ای هستند که در ناحیه طول موجی فرابنفش، مرئی و مادون قرمز نزدیک کار می‌کنند. سنجش طول موج در این طیف‌سنج‌ها توسط یک آرایه از CCDها و یا فوتودیودها صورت می‌گیرد. دقت طول موج اندازه‌گیری آن‌ها ۰/۳ نانومتر بوده و حد توان تفکیک نوری این طیف‌سنج‌ها کمتر از ۱ نانومتر است. از دیگر ویژگی‌های طیف‌سنج‌های ساخت شرکت دانش‌بنیان فتح نور میهن، می‌توان به سرعت بالا در نمونه‌گیری، ابعاد کوچک، وزن بسیار پایین و قابلیت حمل و نقل آسان اشاره کرد. این محصول در سال ۱۳۹۵ موفق به دریافت گواهی دانش‌بنیان از معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری گردید و در بررسی مجدد در سال ۱۳۹۹ تمدید شد. صنایع تولیدکننده منابع نوری، آزمایشگاه‌های تحقیقاتی، مراکز صنعتی، مراکز کالیبراسیون منابع نوری، مختبرات نوری و آزمایشگاه‌های استاندارد کالیبراسیون سنجدادهای فضایی از جمله مهم‌ترین بخش‌هایی هستند که می‌توانند از این طیف‌سنج‌ها استفاده کنند.

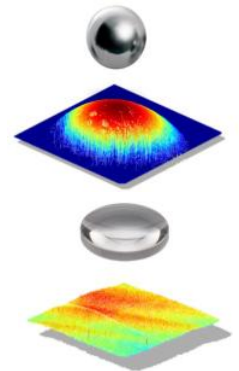


یکی از اجزای مهم در طیف‌سنج‌ها، توری‌های پراش است که کار پراکندگی نور را انجام می‌دهند. توری‌های پراش به روش‌های مختلف در دو نوع بازتابی و عبوری تولید می‌شوند که یکی از دقیق‌ترین گونه‌های آن توری‌های هولوگرافی هستند. توری‌های استفاده شده در طیف‌سنج‌های شرکت فتح اپتیک دارای ۳۰۰ تا ۱۸۰۰ خط در هر میلی‌متر هستند که فاصله این خطوط ۵۰۰ نانومتر است.



سطح سنج سه بعدی نانومتر

دستگاه سطح سنج سه بعدی نانومتری نوری ساخته شده توسط شرکت دانش بنیان فتح نور میهن، نمونه‌ای بسیار توسعه یافته از ابزارهای اندازه گیری سه بعدی در مقیاس نانو بر پایه نور است. این دستگاه بر اساس پدیده تداخل و در دو مد تداخل سنجی میکروسکوپی نور سفید و تداخل سنجی جابه جایی فاز عمل می کند. سرعت بالا، دقت و تکرار پذیری نانومتری از دیگر ویژگی های این محصول است. در خروجی این دستگاه، می توان رویه ی سه بعدی از نمونه مورد آزمون و پارامترهای سطح (شکل، میزان موج دار بودن و زبری) را با دقت نانومتری مشاهده کرد.

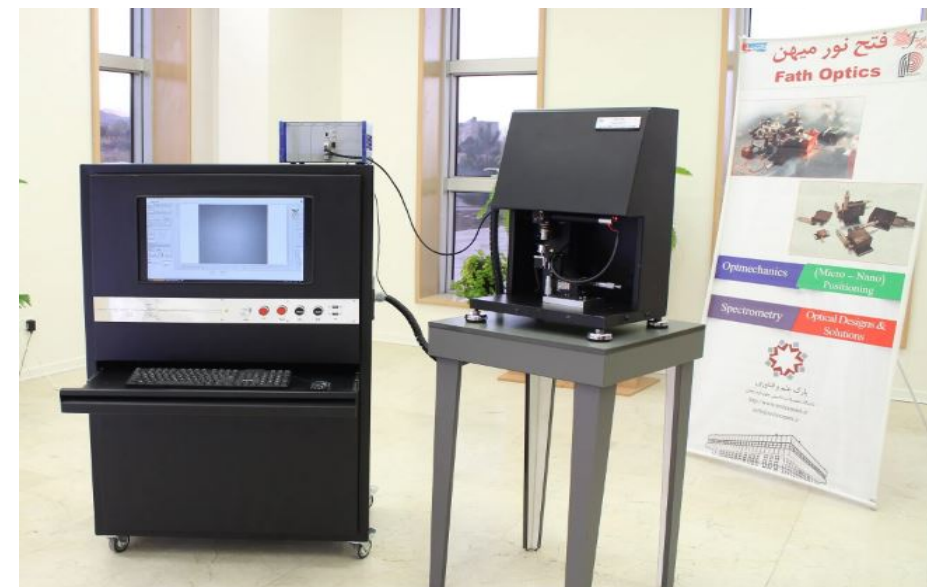


ابزارهای اندازه گیری در مقیاس نانو به طور کلی بر دو پایه الکترونیک و اپتیک طراحی و ساخته می شوند. از آن جایی که اساس کار این دستگاه، اپتیکی است، روشی غیر تماسی، غیر مخرب و دقیق است. از دیگر مزایای این دستگاه در مقایسه با دستگاه های با کاربری مشابه مانند میکروسکوپ AFM و انواع میکروسکوپ های روبشی تماسی، علاوه بر هزینه پایین تر انجام آزمون به دلیل غیرمخرب بودن آن، می توان به وسعت دید بالا، اختصاص رویه سه بعدی نمونه

دستگاه سطح سنج سه بعدی شرکت فتح اپتیک قابلیت بررسی سطوح اجسام با شکل های مختلف و ضریب بازتابندگی پایین را با دقت چند نانومتر دارد.

به صورت یک جا، تعیین سه بعدی نقص هایی مانند شکستگی ها، پله ها و تغییرات تند ارتفاعی در نمونه، تعیین دینامیک سه بعدی نمونه ها و قابلیت داده برداری از نمونه در حالت بازتابی (حتی از نمونه های با بازتابندگی کم) اشاره کرد. تعیین پارامترهای سطوح، در بخش های متنوعی از علوم و صنایع مورد نیاز است. به عنوان مثال علوم مکانیک، زیست شناسی، شیمی، فیزیک و میکروالکترونیک نیاز مبرمی به این دستگاه برای تصویربرداری سه بعدی از نمونه های خود دارند. همچنین این دستگاه در صنایعی مانند متالوژی، مکانیک و صنایع تولید هواپیما، خودرو و توربین های بخار که بررسی خوردگی و ترک در قطعات آن ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است، کاربرد دارد.

با توجه به سطح بالای فناوری مورد استفاده، این دستگاه در کشورهای معدودی از جمله آمریکا و آلمان تولید و به بازار عرضه می شود. دستگاه ساخته شده در شرکت دانش بنیان فتح نور میهن، کامل ترین و دقیق ترین دستگاه از نوع خود در داخل کشور و منطقه است و از کیفیت و قیمت بسیار مطلوبی در مقایسه با نمونه های مشابه خارجی برخوردار است.



نانوجابه جاگر پیزوالکتریک

شرکت دانش بنیان فتح نور میهن، با طراحی و ساخت ماژول پیزوالکتریک، جابه جاگر خطی دستی خود را به این فناوری مجهز کرده است. این نانوجابه جاگر پیزوالکتریک، دامنه حرکتی ۲۰ میکرومتر را با دقت ۱ نانومتر پایش می کند. با استفاده از جابه جاگر دستی می توان ابتدا مکان را با دقتی از مرتبه میکرومتر تنظیم نموده و سپس از ماژول پیزو برای تنظیم دقیق مکان با دقت ۱ نانومتر استفاده کرد. دستگاه دارای دو مد ولتاژ و مکان است. مد ولتاژ از دقت کمتری در تنظیم جابه جایی برخوردار است. ولی در مواردی که نوسان ناشی از ماژول پیزو مشکل ساز باشد، مفید است.

در بسیاری از آزمایشگاه های تحقیقاتی و همچنین در بخش هایی از صنعت، اعمال جابه جایی های بسیار دقیق نانومتری حائز اهمیت است. در دستگاه هایی مانند انواع میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ نیروی اتمی، انواع تداخل سنج ها و تمام نگارها، انبرک نوری، مخابرات نوری، مدارهای مجتمع نوری و چیدمان های اپتیکی که نیاز به تنظیم جابه جایی با دقت و سرعت بالا دارند، نانو جابه جاگر پیزوالکتریک بهترین انتخاب است.

ماژول پیزوالکتریک طراحی شده، از یک قطعه سرامیک پیزوالکتریک به همراه یک حسگر Strain-Gauge و یک دستگاه تقویت کننده ولتاژ جهت تولید ولتاژ [۱۴۰ - ۰] ولت برای تغذیه قطعه پیزوالکتریک تشکیل شده است. خوانش لحظه ای مکان، توسط این حسگر انجام شده و با کمک یک درایور کنترلی امکان تصحیح جابه جایی در هر لحظه به صورت ایجاد بازخورد در مد مکان فراهم می شود.

دستگاه دارای صفحه نمایش است و می توان داده های مکان و ولتاژ را در هر لحظه روی این صفحه مشاهده نمود. همچنین، درایور کنترلی دستگاه از طریق درگاه USB به صورت همزمان قابل اتصال به رایانه است و علاوه بر مشاهده همزمان داده ها بر روی نمایشگر، امکان انتخاب بین مد ولتاژ و مکان، تنظیم ولتاژ کاری، موقعیت مکانی و گام پله های پیچ هرزگرد از طریق نرم افزار طراحی شده برای دستگاه و نرم افزارهای مختلف دیگر نیز فراهم شده است. این جابه جاگر تحمل وزن ۵۰۰ گرم بار را داشته و با توجه به ابعاد کوچکی که دارد به راحتی می تواند در چیدمان های اپتیکی و میزچه های متحرک از جمله میزچه میکروسکوپ استفاده شود.



امید آن می رود در آینده شاهد رشد و شکوفایی بیش از پیش ایده های خلاقانه و کاربردی جوانان مصمم این مرز و بوم در قالب شرکت های دانش بنیانی باشیم که با تولید محصولاتی درخور و شایسته مردمان پاک میهن عزیزمان، چرخ های صنعت و توسعه کشور را به حرکت در آورند.

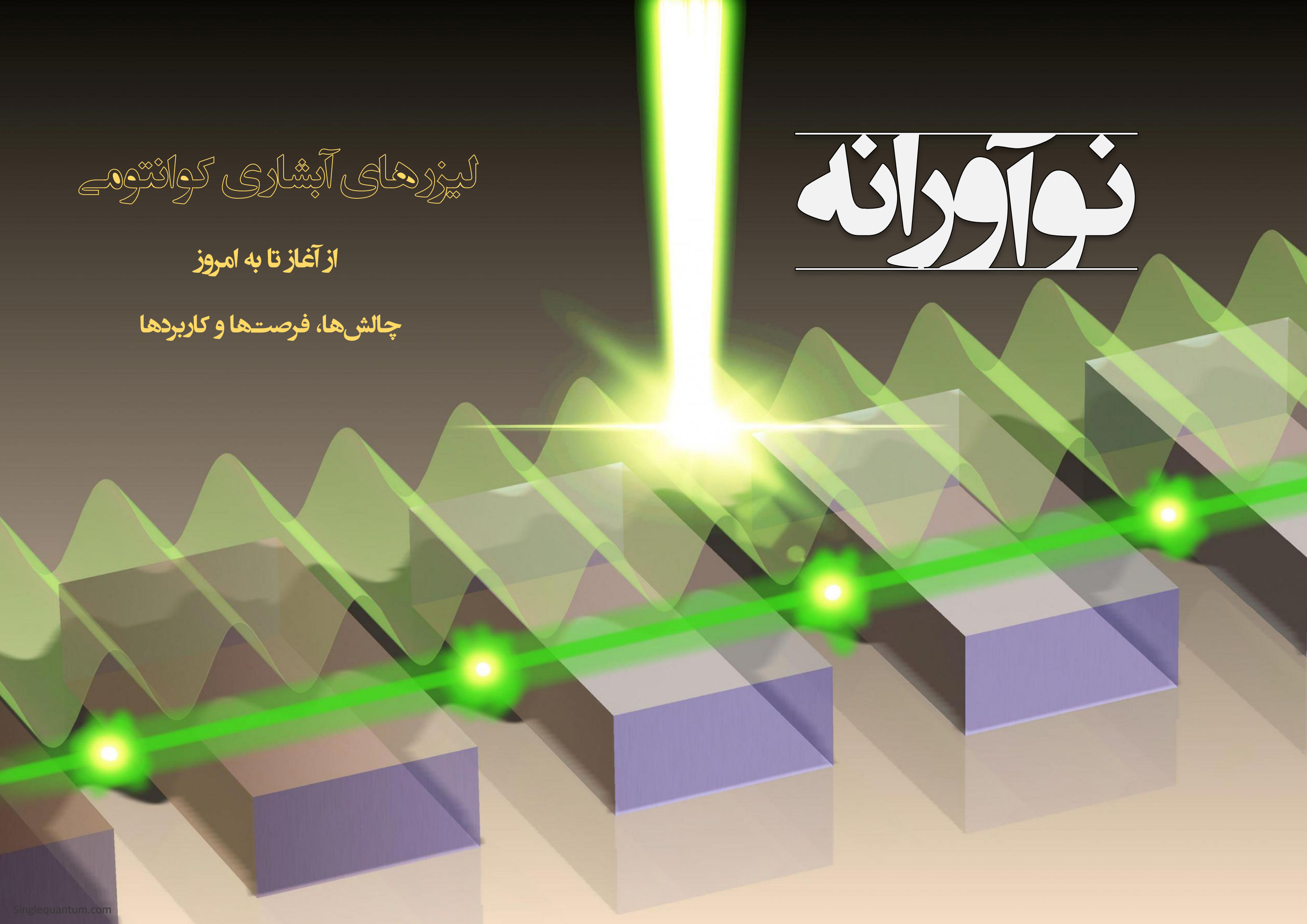


لیزرهای آبخاری کوانتوم

از آغاز تا به امروز

چالش‌ها، فرصت‌ها و کاربردها

# نوآوران

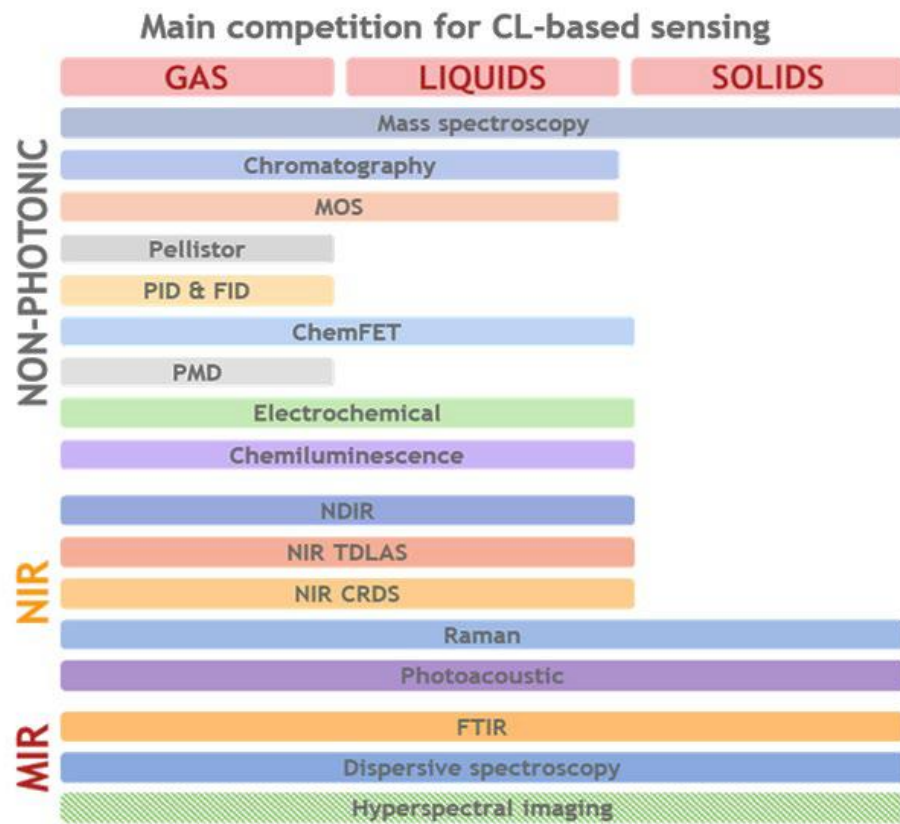
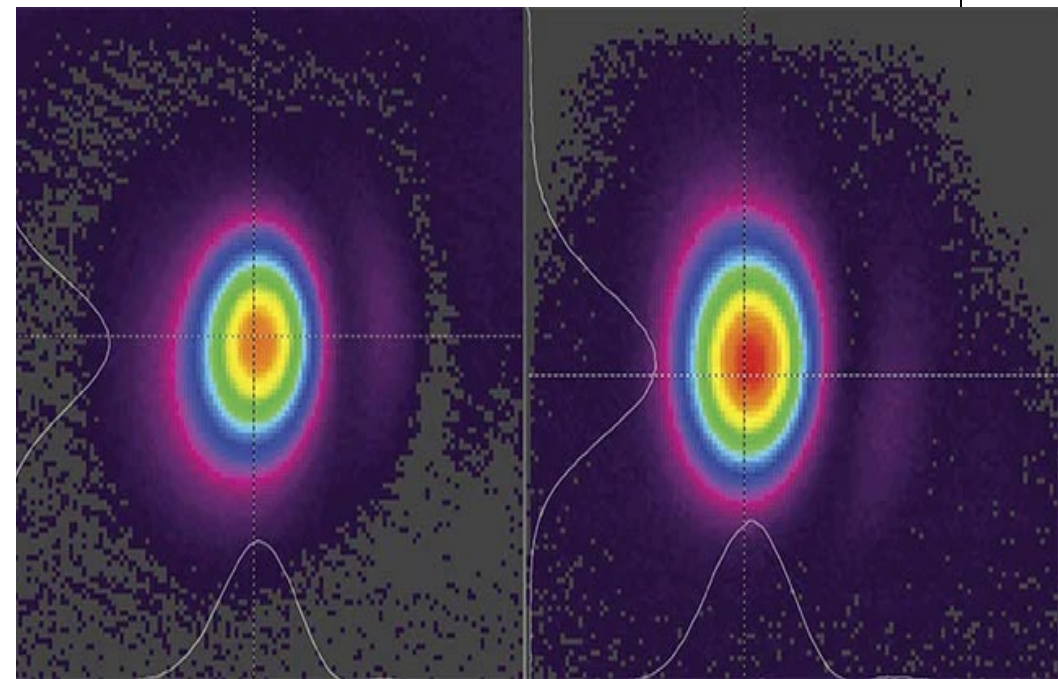






در ماه اکتبر سال ۱۹۷۱ بود که محققان نشان دادند می‌توان امواج الکترومغناطیسی را در یک نیم‌رسانا با یک ابرشیکه تقویت کرد. بیش از ۲۰ سال طول کشید تا دستگاهی که بتواند از این اصل پیروی کند، ساخته شود. در سال ۱۹۹۴، Jérôme Faist و همکارانش نتایج کار بر روی نمونه اولیه منبع لیزری را که بر اساس انتقال بین زیرنوارها و حالات برانگیخته در نوارهای رسانش بین چاه‌های کوانتومی، عمل می‌کند را منتشر کردند. فایست بعدها یکی از بنیانگذاران Alpes Lasers شد. بیش از ۲۰ سال از تجاری‌سازی اولین منابع لیزر آبخاری کوانتومی (QCL) می‌گذرد. QCL‌هایی که در دمای اتاق با استفاده از خنک‌کننده ترموالکتریک کار می‌کنند، اکنون در همه جا وجود دارند. این لیزرها عصر جدیدی از طیف‌سنجی مادون قرمز را آغاز کردند. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های زیادی برای بهبود پایداری، قدرت، گسترش محدوده طیفی، قابلیت تنظیم و عملکرد کلی QCL‌ها صورت گرفته است.

علاوه بر این، نوع دیگری از لیزر ساطع‌کننده میانی IR وجود دارد که تحت عنوان لیزر آبخاری بین بانندی (ICL) شناخته می‌شود. همانند QCL‌ها، هر حامل تزریق شده در ICL‌ها فوتون‌های متعددی تولید می‌کند. ICL‌ها بر اساس ساختارهای ناهمسان نوع II و انتقال بین بانند آبخاری (انتقال بین باندهای الکترونیکی) به جای انتقال بین زیر باندهای QCL عمل می‌کنند. ICL‌ها عملکرد QCL‌ها را در طول موج‌های پایین‌تر تکمیل می‌کنند، در حالی که اغلب خود در محدوده کمتر از ۳/۵ میکرومتر عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهند. شکل زیر پروفایل تابش پرتو معمولی یک لیزر آبخاری کوانتومی (QCL) را به تصویر کشیده است. چنین پیشرفت‌هایی در طیف مادون قرمز منجر به ظهور گستره وسیعی از منابع نور بسیار قدرتمند برای کاربردهای طیف‌سنجی شده است. لیزرهای بین بانندی و آبخار کوانتومی (QCL و ICL) تابشی همدوس با توان بالا را در محدوده مادون قرمز متوسط ارائه می‌دهند که برای طیف‌سنجی گاز با وضوح بالا و سنجش شیمیایی



مواد بسیار موثر عمل می‌کند. با توجه به مزایای فراوان، انتظار می‌رفت که فناوری لیزرهای آبخاری به سرعت بالغ شود و در حجم وسیعی از کاربردها ورود پیدا کند. به ویژه این که ماهیت نیم‌رسانایی ICL‌ها و QCL‌ها باعث شد تا این فناوری تا حد زیادی مقیاس‌پذیر و ارزان شود، همانطور که در گذشته، شاهد رخداد اتفاق مشابهی در رابطه با LED‌ها و VCSEL‌ها بوده‌ایم. VCSEL‌ها لیزرهایی نیم‌رسانا هستند، به ویژه دیودهای لیزری با تشدیدکننده لیزری یکپارچه، که در آن نور ساطع شده دستگاه در جهتی عمود بر سطح تراشه گسیل می‌شود. رشد پویای این فناوری در چند سال اخیر به طور کامل تحقق نیافته است. قیمت لیزرها همچنان بالاست (حدود چند هزار دلار در هر قطعه)، کاربردهای بالقوه‌ای موسوم به "قاتل" هنوز روانه بازار نشده‌اند. لیزرهای آبخاری را می‌توان به طور عمده در کاربردهایی خاص یافت.

دلیل این امر نه تنها در تنگنای فنی، بلکه در بازاری است که آمادگی اجرای فناوری CL را نداشته است. مشتریان بسیار محافظه کار بودند و از رویکردهای رقابتی دیگر برای این منظور بهره نگرفته‌اند. اما اکنون چشم‌اندازها دستخوش تغییر و تحول شده است. شاید مهم ترین کاربرد لیزرهای آبخاری کوانتومی در حوزه طیف‌سنجی جذب لیزری گازهای کمیاب باشد، به عنوان مثال. برای تشخیص غلظت‌های بسیار کمی از آلاینده‌ها در هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر محدوده طول موج مناسب، QCL‌ها اغلب دارای پهنای خط به نسبت باریکی دارند و قابلیت تنظیم طول موج آنها را برای چنین کاربردهایی مطلوب کرده است. لیزرهای آبخاری کوانتومی تراهرتز نیز برای کاربردهای مختلف تصویربرداری جذاب هستند. یکی دیگر از زمینه‌های کاربردی QCL‌های THz ارتباطات فضای آزاد است.

از سال ۱۹۹۷، تلاش قابل توجهی برای توسعه QCL صورت گرفته است، به ویژه با توجه به قدرت، کارایی دوشاخه دیوار (WPE)، عملکرد تک حالت، تنظیم و کیفیت پرتو، QCL را از یک ابزار آزمایشگاهی به یک محصول گسترده تبدیل کرده است که این امر به نفع عموم مردم است. بتازگی QCL‌هایی کارآمد و قدرتمند با عملکرد موج پیوسته در دمای اتاق با ۲۱% WPE و توان خروجی ۵/۱ وات ساخته شده‌اند. به طور کلی، WPE بالاتر منجر به قدرت خروجی بالاتر می‌شود.



کاربردهایی مانند تصویربرداری مادون قرمز از مقاطع نازک بافت، طیف‌سنجی مبتنی بر لیزر نمونه‌های مایع یا گاز، نظارت بر نشانگرهای زیستی، تشخیص پاتوژن‌ها، تجزیه و تحلیل و توسعه داروها تنها چند نمونه از کاربردهای لیزرهای مادون قرمز میانی در علوم زیستی هستند.



### Current employment of Cascade Lasers



اگرچه پرتوهای تراهرتز واگرایی پرتویی بسیار قوی‌تری نسبت به سایر پرتوهای نوری نشان می‌دهند، هنوز هم می‌توان از پرتوهای جهت‌دار برای انتقال در فواصل کوتاه از طریق هوا استفاده کرد.

یک مثال از کاربردهای نظامی این ابزارهای نوری، استفاده از آن برای انجام اقدامات متقابل مادون قرمز است، به عنوان مثال، موشک‌های تحریرکننده گرمایاب که با ارسال نور مادون قرمز میانی به حسگرهای هواپیماها به آنها حمله می‌کنند.

درست همان طوری که دستگاه‌های طیف‌سنجی فرورسوخ تبدیل فوریه (FTIR)، جایگزین طیف‌سنج‌های پراکنده شدند، QCLها هم اکنون جایگزین دستگاه‌های FTIR شده‌اند که همین امر منجر به تغییر پارادایم دیگری می‌شود.

زیست‌شناسی، آسیب‌شناسی و سم‌شناسی در صنعت علوم زیستی و همچنین صنایع مراقبت‌های بهداشتی و دارویی، چندحوزه کلیدی تحقیقاتی است. که از QCLها به خوبی بهره برده‌اند.

QCLها با افزایش قدرت (که امکان نفوذ به نمونه‌های ضخیم‌تر را می‌دهند)، سرسختی (Ruggedness) و فشردگی بودنشان (که به آنها اجازه می‌دهد در محیط‌های بالینی مستقر شوند) به سرعت به یک فناوری پیشرو برای انجام تحقیقات پزشکی تبدیل شده‌اند.

کاربردهایی مانند تصویربرداری مادون قرمز از مقاطع نازک بافت، طیف‌سنجی مبتنی بر لیزر نمونه‌های مایع یا گاز، نظارت بر نشانگرهای زیستی، تشخیص پاتوژن‌ها، تجزیه و تحلیل و توسعه داروها تنها چند نمونه از کاربردهای لیزرهای مادون قرمز میانی در علوم زیستی هستند.

در حوزه‌های زیست پزشکی QCLها کاربردهای پزشکی فعال را بهبود داده‌اند که از تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی نمونه‌ها گرفته تا برنامه‌های نظارت مداوم غیرتهاجمی گلوکز، همه و همه را شامل می‌شود. در حالی که پیشرفت‌های زیادی صورت گرفته است، جامعه زیست پزشکی هنوز پتانسیل کامل فناوری QCL را کشف نکرده است. در شکل بالا می‌توانید گستره وسیع کاربردهای این خانواده از لیزرها را مشاهده

کنید. تاکنون از ICL و QCL به صورت خاص در موارد زیر استفاده شده است:

\* هنگامی که زمان اندازه‌گیری بسیار مهم باشد. اندازه‌گیری از راه دور گازها/ مایعات (یا پلاسما) در خط فرآیند، با هدف نظارت بر چند گونه به صورت همزمان (فرایندهای احتراق، انتشار نیروگاه ...).

\* هنگامی که هیچ راه دیگری برای اندازه‌گیری گازها یا مواد توسط تجهیزات رقابتی (عدم وجود خطوط جذب در NIR/SWIR برای NO<sub>x</sub> یا جذب بسیار ضعیف برای SO<sub>x</sub>، گازهای سمی در تولید داروها) وجود نداشته باشد.

• در صنایع دفاعی (اقدامات متقابل مادون قرمز، چراغ‌ها و ...).

ICLها و QCLها با مزایای رقابتی منحصر به فرد خود از دیگر منابع فوتونی متمایز می‌شوند:

• این منابع همانطور که پیش‌تر هم اشاره شد، لیزرهای پهن باندی هستند که با برخورداری از قابلیت تنظیم مناسب، امکان بررسی گونه‌های متعددی را تنها با استفاده از یک فناوری فراهم می‌کند.

• پهنای خط باریک با وضوح بالایی را ارائه می‌دهد.

• کلیدزنی سریع و همچنین مدت زمان پالس کوتاه، امکان نظارت از راه دور و روی خط را فراهم می‌کند.

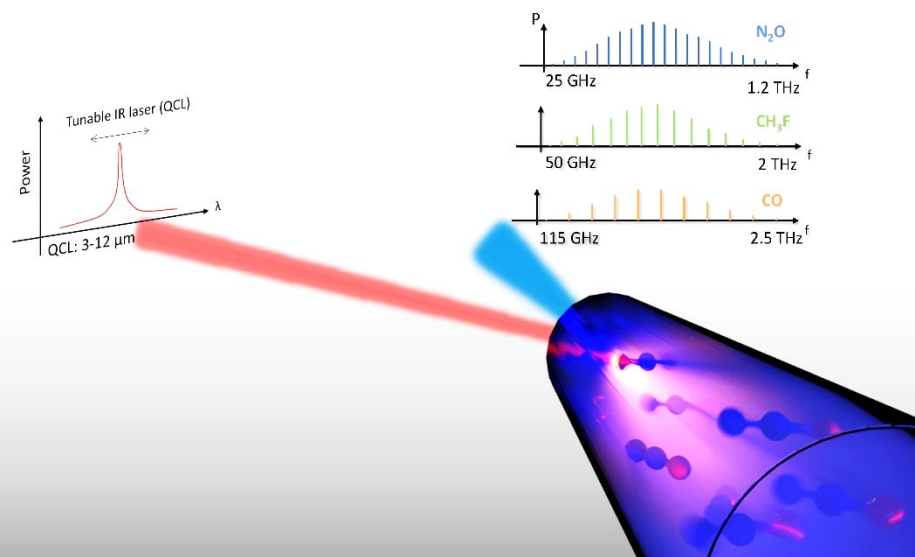
• اندازه‌گیری بدون نشان‌گذاری در محل، بدون نیاز به نگهداری از دیگر مزایای این گونه لیزرها است.

• قدرت نوری بالا که منجر به نسبت سیگنال به نویز قابل توجهی می‌شود.

همانطور که قبل‌تر هم عنوان شد، لیزرهای آبخاری در کاربردهای صنعتی و محیطی به وفور مورد استفاده قرار گرفته‌اند، جایی که می‌توانند نظارت سریع درون خطی و آنالیز بر کنترل فرآیندهای اصلی و گازهای آلاینده‌ای همچون CO<sub>2</sub>، CO، CH<sub>4</sub>، H<sub>2</sub>O، SO<sub>x</sub>، NO<sub>x</sub> و غیره را ارائه دهند. این در حالی است که انطباق‌پذیری در تحلیلگرهای دیگر آنقدر گسترده نیست.

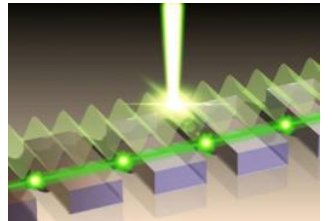
حال که با کاربردها و مزایای این نسل جدید از لیزرها آشنا شدید، در ادامه به بررسی ساز و کار و نحوه عملکرد این دسته از لیزرهای نیم‌رسانا می‌پردازیم.

لیزر آبشار کوانتومی نوع خاصی از لیزر نیم‌رسانا است که اغلب نور مادون قرمز میانی را از خود ساطع می‌کند. چنین لیزری بر اساس انتقال‌های لیزری نه بین نوارهای الکترونیکی مختلف بلکه



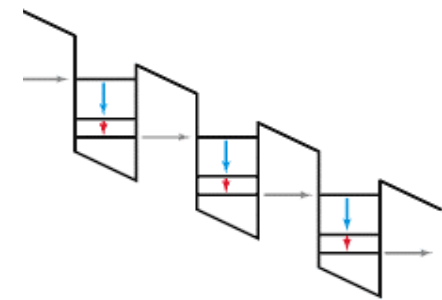
منطقه طیفی تراهرتز (THz) (۳۰۰ گیگاهرتز تا ۱۰ تراهرتز) هنوز آن طور که باید شاید توسعه نیافته است. در واقع، فقدان منبع تابش فشرده، حالت جامد و همدوس دلیل اصلی این توسعه نیافتگی است. در واقع، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌هایی از تصویربرداری و سنجش شیمیایی گرفته تا مخابرات انجام شده است که ظرفیت بالای موج THz را نشان می‌دهد. لیزرهای آبخاری کوانتومی (THz-QCLs) به عنوان امیدوارکننده‌ترین نامزد برای منبع تابش THz حالت جامد در نظر گرفته می‌شوند.





در سال گذشته، محققان مرکز فوتونیک و نانوالکترونیک Lehigh از رویکرد قفل فاز جدید برای دستیابی به توان خروجی بالا برای لیزرهای تراهرتز بهره گرفتند و بالاترین بازده تابشی را برای لیزر آبخاری کوانتومی نیم‌رسانای تک طول موج گزارش کردند. آرایه لیزر پلاسمونیک تراهرتز قفل فاز با توان خروجی ۲ وات در حالت تک طیفی توسط این محققان به ثبت رسیده است.

بر روی انتقال‌های بین زیرنوارهای یک ساختار نیم‌رسانا عمل می‌کند. شکل زیر سرنوشت الکترون تزریق شده به ناحیه بهره را به تصویر کشیده است. در هر دوره از ساختار، اولین انتقال (که با پیکان آبی نشان داده شده است) بین دو سطح فرعی (minibands) یک چاه کوانتومی (که انتقال لیزری است که در آن گسیل تحریک شده است) صورت می‌گیرد. سپس یک انتقال غیرتابشی (فلش قرمز) به پایین‌ترین سطح فرعی، قبل از تونل زدن (فلش خاکستری) به سطح بالایی چاه کوانتومی بعدی رخ می‌دهد.



طرحواره ساده شده ناحیه بهره یک لیزر آبخاری کوانتومی در شکل بالا نشان داده شده است. این نمودار انرژی الکترون را در موقعیت‌های مختلف درون ساختار نشان می‌دهد که شامل سه چاه کوانتومی است. روند نزولی کلی انرژی به سمت راست توسط یک میدان الکتریکی اعمال شده، ایجاد می‌شود. در واقع، هر ناحیه افزایش باید به یک منطقه فعال و یک انژکتور تقسیم شود. با بهره‌گیری از چند ده یا حتی چند صد چاه کوانتومی در یک سری (یک آبخار)، بهره نوری بالاتر و فوتون‌های متعدد در هر الکترون به دست می‌آید که البته بهای آن استفاده از ولتاژ الکتریکی بالایی است. ولتاژ کاری برای این افزاره‌ها به راحتی می‌تواند در حد ۱۰ ولت باشد، در حالی که ولتاژ کمی برای عملکرد لیزر دیودهای معمولی نیاز است. تعیین انرژی‌های گذار بر اساس ویژگی‌های معین مواد و نیز پارامترهای طراحی (به ویژه با مقادیر ضخامت

لایه چاه‌های کوانتومی) صورت می‌گیرد. در نتیجه لیزرهای آبخاری کوانتومی را می‌توان برای طول موج‌های عملیاتی از چند میکرون تا بالاتر ۱۰ میکرومتر یا حتی در منطقه تراهرتز سفارشی‌سازی کرد. توجه داشته باشید که یک حامل تزریق شده می‌تواند (در حالت ایده‌آل) بازده کوانتومی کامل) یک فوتون برای هر منطقه چاه کوانتومی تولید کند.

در لیزرهای آبخاری کوانتومی، ساختار چاه کوانتومی ذکر شده در داخل یک موج‌بر تعبیه شده است و تشدیدکننده لیزر بیشتر مشابه لیزرهای DBR یا DFB است. البته لیزرهایی با کاواک خارجی نیز وجود دارد که در آن یک عنصر تنظیم‌کننده طول موج مانند توری پراش بخشی از تشدیدکننده است.

DBR یا لیزر بازتابنده براگ توزیع شده، لیزری است که در آن تشدیدکننده لیزر با حداقل یک بازتابنده براگ توزیع شده (DBR) خارج از محیط بهره (ناحیه فعال) ساخته می‌شود.

DFB لیزر بازخورد توزیع شده (لیزر DFB) لیزری است که در آن کل تشدیدکننده از یک ساختار تناوبی در محیط بهره لیزر تشکیل شده است که به عنوان یک بازتابنده براگ توزیع شده در محدوده طول موج عمل لیزر عمل می‌کند.

دستگاه‌هایی که در دمای اتاق به طور پیوسته عمل می‌کنند، اغلب به سطوح توان خروجی متوسط در ناحیه میلی‌وات محدود می‌شوند (اگرچه بیش از یک وات هم ممکن است). دستیابی به خروجی چندین وات به راحتی با خنک‌سازی نیتروژن مایع امکان‌پذیر است. حتی در دمای اتاق، هنگام استفاده از پالس‌های کوتاه، دستیابی به بیشینه توانی در سطح وات امکان‌پذیر است.

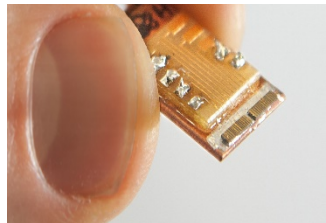
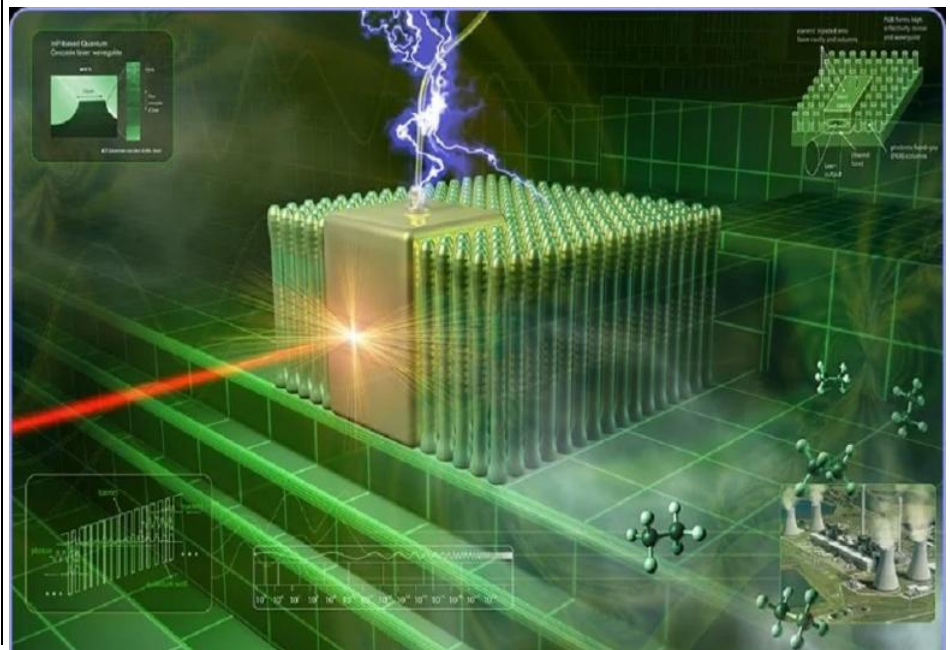
بازده تبدیل توان لیزرهای آبخاری کوانتومی اغلب در حد چند ده درصد است. با این حال، به تازگی دستگاه‌هایی با بازدهی حدود ۵۰ درصد نیز عرضه شده‌اند، اگرچه تنها در شرایط

عملیات برودتی عمل می‌کنند. طول عمر حامل‌ها در لیزرهای آبخاری کوانتومی بسیار کمتر از دیودهای لیزر معمولی است. چرا که اغلب توسط پدیده‌های پراکندگی فونون محدود می‌شود. این امر همچنین بر خواص دینامیکی لیزر نیز تاثیر می‌گذارد. به طوری که میرایی بسیار قوی نوسانات واهلشی را به دنبال دارد. به همین دلیل، لیزرهای آبخاری کوانتومی را می‌توان با پهنای باند ذاتی بسیار بالا و محدود از چند ده گیگاهرتز مدوله کرد. ضمن آن که پهنای خط انتشار این نوع لیزرها اغلب کوچک است که آن را برای کاربردهای طیف‌سنجی نیز مفید کرده است.

حال که با ساز و کار عملکرد این لیزرها آشنا شدیم، در ادامه قصد داریم به بررسی یکی از جدیدترین دستاوردهای دانشمندان در بهره‌گیری از این گونه لیزر در حوزه ارتباطات نوری بپردازیم. ارتباطات نوری فضای آزاد مادون قرمز میانی به دلیل مصونیت در برابر تداخل الکترومغناطیسی، ظرفیت زیادی برای ارتباطات با سرعت بالا دارد.

با این حال، امنیت داده‌ها در برابر استراق سمع یکی از موانع ارتباطات فضای آزاد خصوصی به

شمار می‌آید. در مقاله‌ای که به تازگی توسط محققان منتشر شده است، آنها از دو لیزر آبخاری کوانتومی جفت‌شده یک طرفه بهره گرفته‌اند که در رژیم بی‌نظم کار می‌کنند و همگام‌سازی بین آنها امکان استخراج اطلاعاتی را فراهم می‌کند که در گسیل بی‌نظم استتار شده‌اند. این سازه در واقع ابزاری کلیدی برای حفظ حریم خصوصی به طور مستقیم است. لیزرهای به کار رفته تابش تک حالتی، در طول موجی در حدود ۵/۷ میکرومتر را ساطع می‌کنند و در هنگام تغییر دما یا جریان کار، طول موجشان تغییر می‌کند. با این حال، دو QCL به کار رفته از نظر توان خروجی متفاوت هستند. در این پژوهش از دو لیزر QCL موسوم به Slave و Master بهره گرفته شده است که هر دو از یک دسته هستند و طول حفره داخلی یکسانی دارند، به این معنی که پارامترهای میکروسکوپی آنها مانند طول عمر حامل، بهره و طول عمر فوتون یکسان هستند. این لیزرها به لطف پیکربندی استاندارد دو ترانشه بدون رشد مجدد فسفید ایندوم دوپ شده با آهن برای بهینه سازی کاهش حرارت، موجی پیوسته ساطع می‌کنند.



امکان برقراری ارتباط با سرعتی حدود ۷۰ مگابیت بر ثانیه با لیزرهای آبخاری بین باند (ICLs) به ثبت رسیده است و انتقال با سرعت چندین گیگابیت بر ثانیه با تبدیل طول موج پایین و تبدیل به بالا نیز برای طول موج‌های به ترتیب بین ۱۵۵۰ نانومتر و ۳۵۹۴ نانومتر به دست آمد. با لیزرهای آبخاری کوانتومی (QCLs)، انتقال اطلاعات با سرعت‌های بالای مشابه، هم در دمای اتاق و هم در دمای برودتی گزارش شده است.

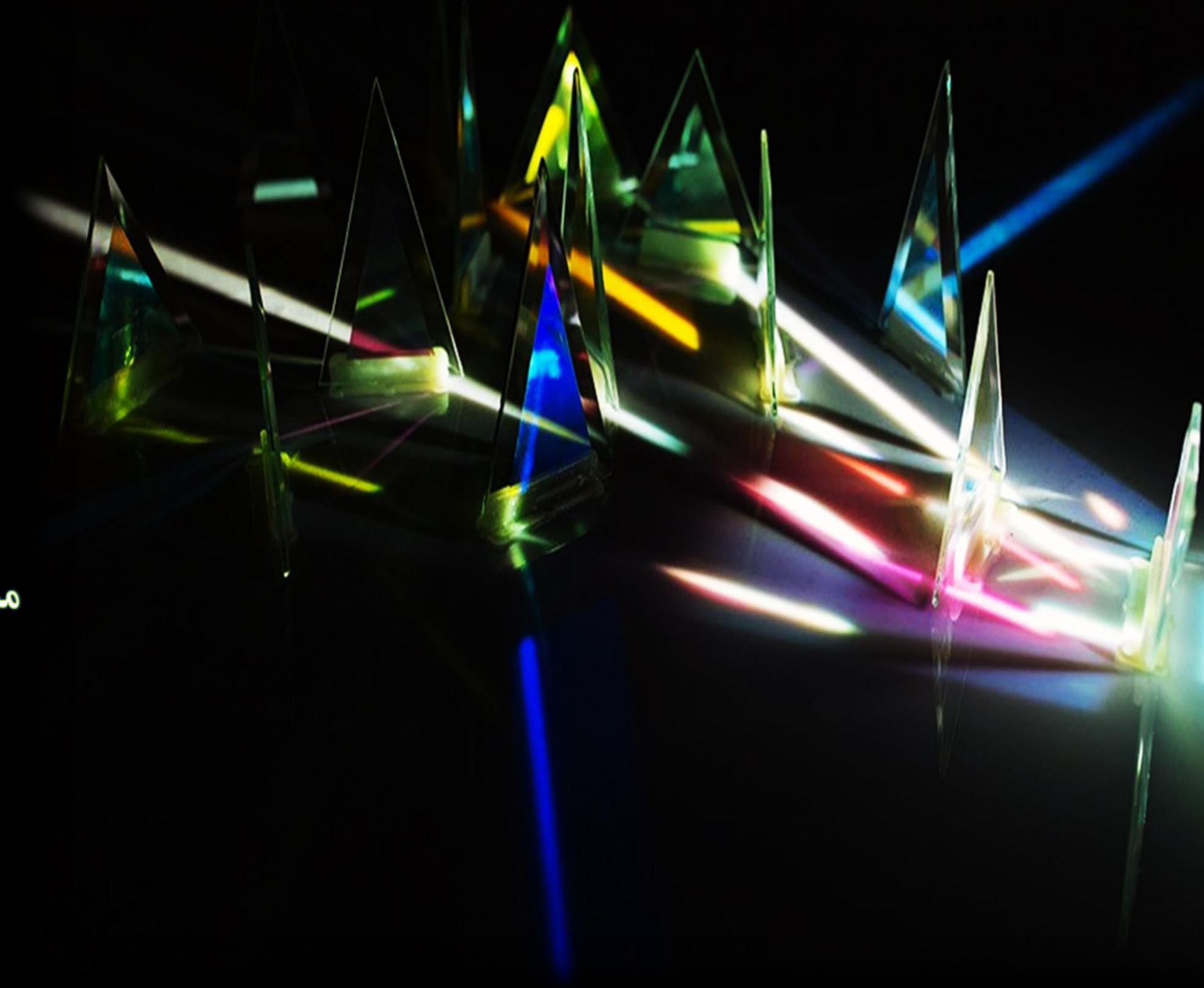


# دروازه های علم

سی لیزردریکی!

مشاهده مستقیم درهم تنیدگی

ماکروسکوپی







سه لیزر در یک!

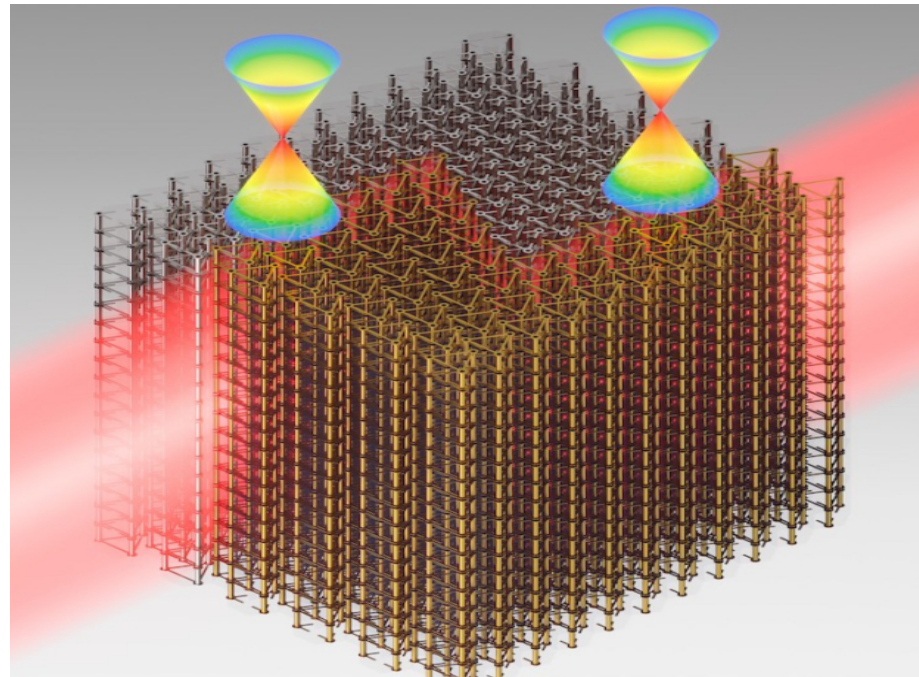
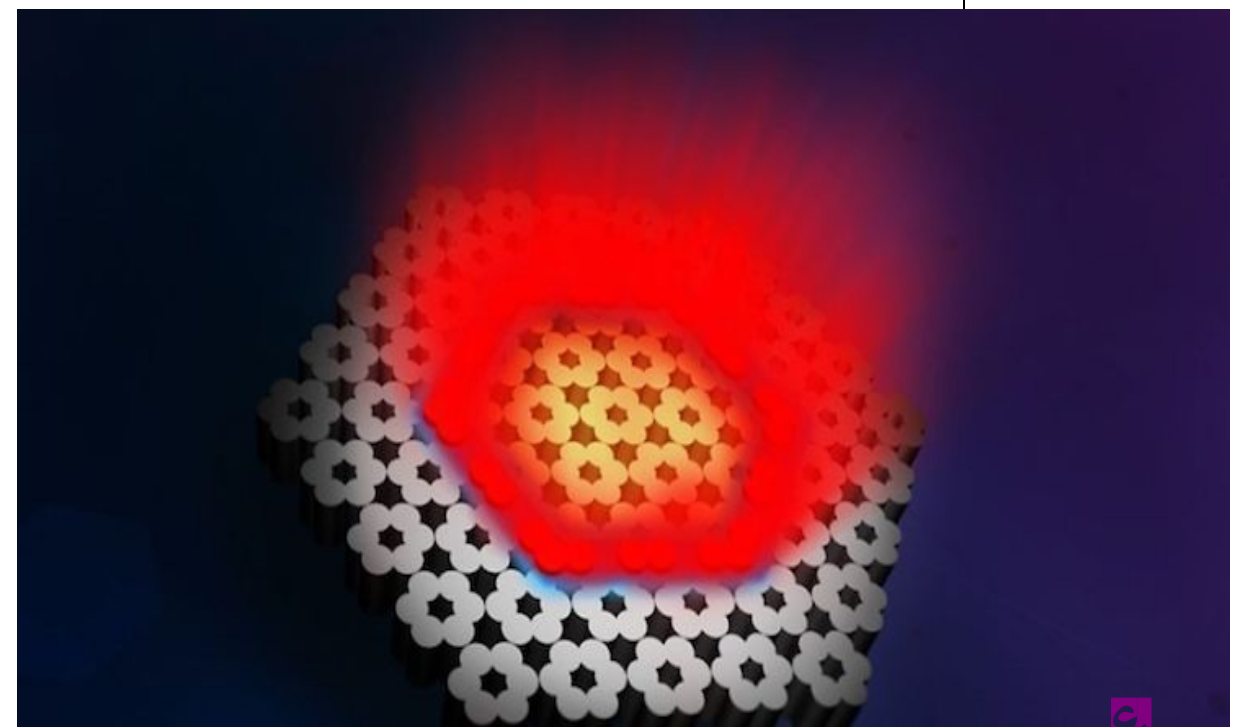
در سال میلادی گذشته، جامعه علمی شاهد تحولات و دستاوردهای جالب توجهی بود. در این مجال قصد داریم، از بین ده نامزد نهایی دستاورد برتر سال ۲۰۲۱ که توسط نشریه معتبر Physics World معرفی شده‌اند، دو فناوری جذاب و انقلابی را بررسی کنیم. دستاورد اول، مربوط به طراحی لیزرهای عایق توپولوژیکی است. این لیزر که حاوی آرایه‌ای از سی لیزر ساطع‌کننده سطحی با کاواک عمودی موسوم به VCSEL است، برای اولین بار به عنوان منبع تولیدکننده نور همدوس با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفت و راه را برای تولید این گونه افزارها در مقیاس بزرگ و توان بالا هموار کرد. رویایی که تا پیش از این دور از دسترس می‌نمود.

لیزرهای VCSEL رایج‌ترین گونه لیزرها در جهان هستند که به طور معمول در حوزه‌های کاربردی از تلفن‌های قابل حمل و ارتباطات نوری گرفته تا ابزار دقیق، ساخت، سنجش و حتی تشخیص چهره استفاده می‌شوند.

مانند سایر لیزرها، آنها نیز شامل یک محیط بهره هستند که نور در آن تولید و ساطع می‌شود. برای VCSELها، این محیط بهره از چاه‌های کوانتومی یا نقاط کوانتومی خاصی ساخته شده و بین دو آینه قرار می‌گیرد که به عنوان یک کاواک عمل می‌کنند و بازخورد نوری لازم برای لیزر را فراهم می‌کنند. ضخامت محیط بهره به اندازه کسری از میکرون است که به VCSELها امکان دستیابی به سرعت کلیدزنی بالایی و همچنین ساختاری فشرده و سبک می‌دهد.

در طراحی خاص این نوع لیزر از مفاهیم مطرح در حوزه عایق‌های توپولوژیکی بهره گرفته شده و توسعه‌دهندگان آن اکنون در تلاشند تا این فناوری را در زمینه‌های پزشکی و شبکه‌های ارتباطی به صورت صنعتی به کار بگیرند.

با این حال، اندازه کوچک VCSELها، قدرت خروجی آن را به شدت محدود می‌کند. طی چند دهه گذشته، محققان به دنبال افزایش قدرت خروجی این لیزرها از طریق ترکیب شماری از VCSELها و تبدیل آنها به افزارهای با عملکردی



مشابه یک لیزر واحد بوده‌اند. مشکل اینجا بود که نقص‌های اجتناب‌ناپذیر در ساخت باعث می‌شد تابش VCSELها در گروه‌های کوچک و مستقلی که با سایرین هماهنگ نبودند، از بین بروند و آرایه نوری ناهمدوس را نتیجه می‌داد.

اما اکنون محققان راهی برای یک دست کردن VCSELهای منفرد پیدا کرده‌اند. این امر با چیدمان VCSELها در هندسه‌ای که از برخی مفاهیم عایق‌های توپولوژیکی پیروی می‌کند، محقق شده است - مواد کوانتومی که بخش عمده آنها عایق است، اما سطح آنها رسانای عالی الکتروسیسته هستند. این رفتار از ویژگی‌های غیرمتعارف توپولوژیکی در ساختار نواری این دسته از مواد ناشی می‌شود.

درون توده این مواد یک گاف انرژی الکترونی وجود دارد که به همین دلیل مشابه یک ماده عایق هستند، ولی در سطح این مواد حالت‌های سطحی بدون گاف انرژی و برخوردار از خاصیت رسانندگی وجود دارد. وجود حالت‌های فلزی و بدون گاف در سطوح می‌تواند به خواص غیرعادی در هدایت الکترونی منجر شود.

اگرچه عایق‌های توپولوژیکی سال‌ها پیش کشف شدند، این حوزه در سال ۲۰۱۳ توسط محققان دانشگاه روستوک، زمانی که اولین عایق توپولوژیکی فوتونیک را ارائه کردند، دستخوش تغییر شد. کار آنها زمینه جدیدی را در فیزیک گشود که اکنون به عنوان فوتونیک توپولوژیکی شناخته می‌شود.

هنگامی که این گروه کار بر روی لیزرهای عایق توپولوژیکی را آغاز کرد، جامعه تحقیقاتی نسبت به آن تردید داشتند. همه لیزرها به محیط بهره نیاز دارند، اما در آن زمان، دانش موجود در مورد سامانه‌های توپولوژیکی، محدود به سامانه‌هایی بود که هرمیتی بودند - یعنی هیچ بازده و اتلافی از خود نشان نمی‌دادند. Segev یکی از محققان فعال در این حوزه، در این باره گفته است: "ما مانند یک مشت دیوانه بودیم که به دنبال چیزی می‌گشتیم که غیرممکن تلقی می‌شد!"

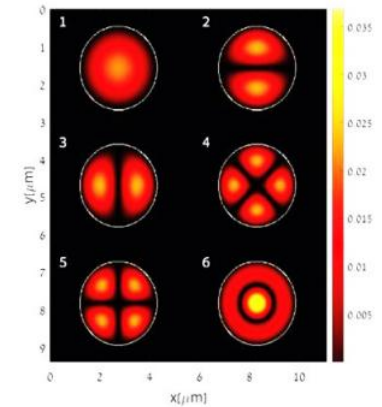
در واقع این محققان برای دستیابی به هدف خود یعنی ساخت لیزرهای توپولوژیکی با یک چالش بنیادی مواجه بودند، چرا که بر اساس مطالعات نظری آن زمان، در اصل این مواد نمی‌توانستند

برای ارتقای لیزرینگ حالت لبه توپولوژیکی، آنها فقط فصل مشترک رابط بین شبکه‌های لانه زنبوری فشرده و کشیده را پمپ کردند. برای این منظور، از پمپاژ نور پالسی بهره گرفتند و ساختار شدت پرتو پمپ را با استفاده از یک مدولاتور نور فضایی فقط فازی HOLOEYE Photonics (SLM)، (GAEA-2) شکل می‌دهند.

پمپاژ نوری با استفاده از تحریک غیررزونانسی با یک لیزر پالسی تیتانیوم-یاقوت کیود صورت گرفت. نور این لیزر، پلاریزه خطی بوده و پالسی با نرخ تکرار ۸۲ مگاهرتز و طول پالس ۱۰ ps دارد. طول موج لیزر برابر با ۷۸۶ نانومتر تنظیم شده است که با کمینه باند پارانرژی ساختار میکروکاواک هماهنگ است.



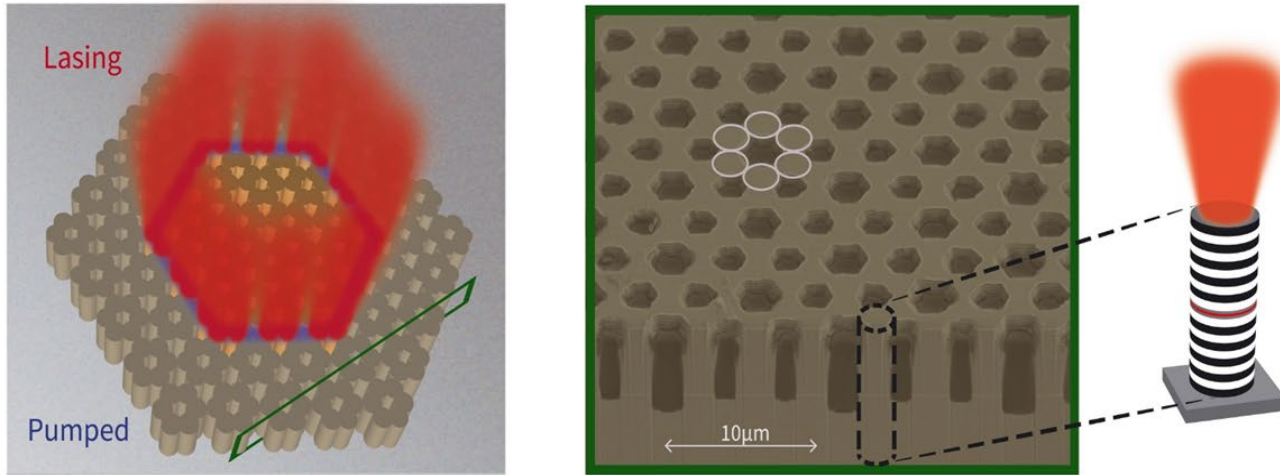
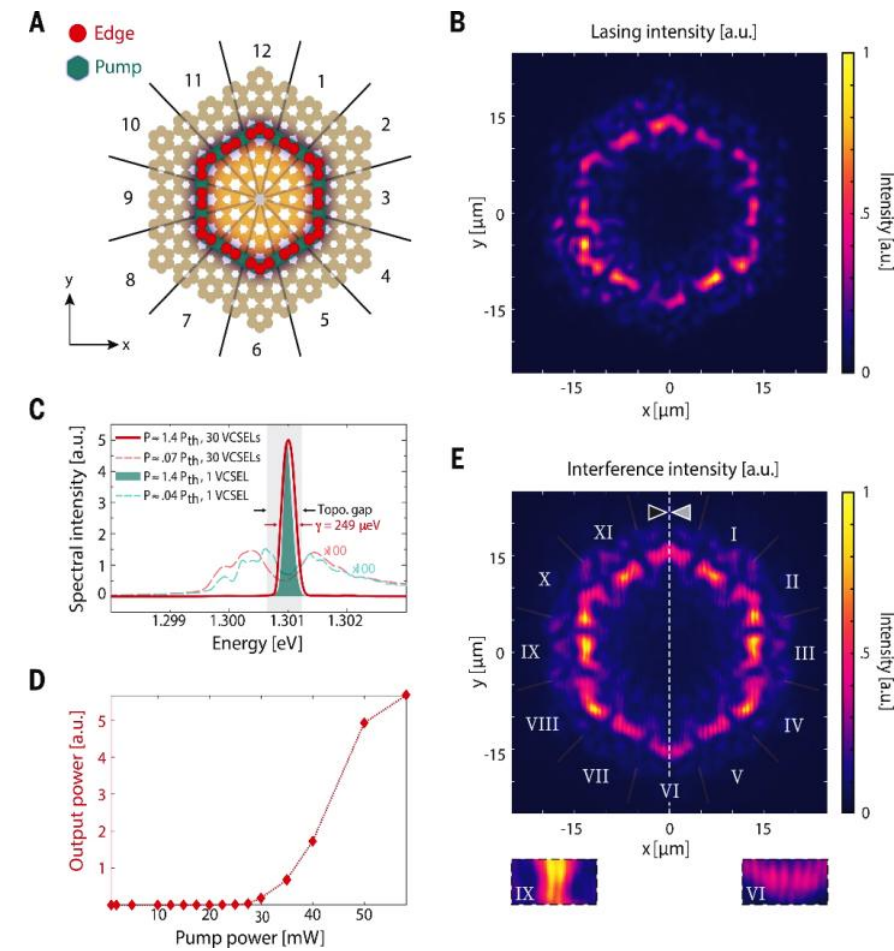




انتشار حاصل با استفاده از یک میکروسکوپ شیئی (۲۰ برابر،  $NA=0.4$ ) جمع‌آوری می‌شود و در شکاف ورودی طیف‌سنج Czerny-Turner، مجهز به یک دوربین CCD با وضوح حدود  $20 \mu\text{eV}$  تصویربرداری می‌شود. شکل بالا دامنه شش مد اول یک VCSEL تنها را نشان می‌دهد که بر اساس ویژه حالت‌های محاسبه شده، به دست است.

شرط اولیه تولید نور لیزر را برآورده کنند. در اولین لیزر توپولوژیکی فوتونیک ساخته شده توسط این گروه تحقیقاتی، نور در اطراف لبه‌های یک آرایه دوبعدی از موجرها حرکت می‌کرد، بدون اینکه توسط نقص یا اختلال در موجرها منحرف شود. چند سال بعد، Segev و همکارانش از دانشگاه فلوریدا مرکزی، مرده دادند که با استفاده از رویکردی خاص می‌توانند میکرولیزرهای منفرد را وادار کنند که با هم لیزر کنند و به عنوان یک لیزر عمل کنند. با این حال، این سامانه همچنان از یک محدودیت مهم رنج می‌برد. در واقع، نوری که در ساختار فوتونیک در گردش بود به همان صفحه‌ای محدود می‌شد که از آن سمت خارج

می‌شد. این بدان معناست که توان خروجی این سامانه باز هم به اندازه دستگاه محدود شده بود. از این رو، محققان این بار از رویکردی خلاقانه برای چیدمان عایق‌های توپولوژیکی بهره گرفته‌اند که تولید نور همدوس لیزری را تضمین می‌کند. آرایه جدید عایق توپولوژیکی VCSEL، از دو نوع شبکه لانه زنبوری با یک ستون در مقیاس نانو در هر رأس تشکیل شده است. محققان از یک فصل مشترک برای ایجاد ارتباط بین لانه زنبوری‌های کشیده و لانه زنبوری‌های فشرده بهره برده‌اند. با در نظر گرفتن پارامترهای مناسب و ایجاد یک رابط توپولوژیکی مطلوب، نور قادر خواهد بود از یک VCSEL به VCSEL بعدی جریان یابد. این جریان ثابت نور در صفحه تراشه نور هر لیزر را وادار می‌کند به نور دیگر



لیزرها برسد تا بتوانند به صورت همدوس با هم قفل شوند و یک باریکه لیزری واحد را بسازند. بنابراین نور تمام آرایه‌های VCSEL در یک فرکانس منتشر می‌شود و با هم تداخل می‌کنند. از همه مهمتر، اکنون نور هر لیزر از طریق سطح ساختار ساطع می‌شود و همین امر جمع‌آوری آن را تسهیل می‌کند. اگر برای شما هم جالب است بدانید که این لیزرهای پیشرفته امروزی چگونه ساخته می‌شوند، در ادامه با ما همراه باشید. ساختار آرایه‌ای VCSEL عایق توپولوژیکی کریستالی از میکروستون‌های جفت شده در یک میکروکاواک نیم‌رسانای مسطح فابری-پرو، که به روش رشد همبافته باریکه مولکولی رشد داده شده‌اند، حک (Etch) می‌شود. این کاواک، یک کاواک  $\lambda$  GaAs است که با لایه‌ای متشکل از نقاط کوانتومی  $\text{In}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$  که بین دو بازتابنده براگ توزیع شده متشکل از یک جفت آینه بالایی (پایین) GaAs/AlAs قرار گرفته، تجهیز شده است. نقاط کوانتومی در مرکز کاواک قرار می‌گیرند، جایی که دامنه میدان الکترومغناطیسی بیشینه است. بیشینه طول موج تابشی مجموعه نقاط کوانتومی در انرژی  $E=1.32 \text{ eV}$  با عرض طیفی  $17 \text{ meV}$  برای این ماده به ثبت رسید.

اندازه‌گیری پهنای خط حالت در حدود  $8000 \text{ meV}$  ( $\gamma=0.16$ ) تعیین شد. ضخامت لایه کلی به صورت شعاعی به جهت بیرون ویفر کاهش می‌یابد، که این امر اغلب بر حالت فوتونیک تأثیر می‌گذارد و این امکان را فراهم می‌کند که بتوان همپوشانی بهره را تنظیم کرد. ضریب کیفیت کاواک به طور تجربی با پس از رشد نمونه، شبکه‌های VCSEL با ابعاد تقریبی  $(120 \times 120)$  میکرومتر مربع و قطر ستون‌های  $d=2/5$  میکرومتر درون میکروکاواک حک می‌شوند. فواصل ستون کاهش یافته  $U=a/d$  برای  $U_i^C=0.98$  و  $U_e^C=0.80$  برای شبکه فشرده و  $U_i^S=0.94$  و  $U_e^S=0.74$  برای شبکه کشیده، در نظر گرفته شده است. در اینجا،  $a$  نشان‌دهنده فاصله بین مراکز،  $d$  قطر،  $U_i$  نشان‌دهنده همپوشانی بین سلولی و  $U_e$  همپوشانی بین سلول‌های واحد مجاور را نشان می‌دهد. فصل مشترک در مجموع شامل ۳۰ میکرولیزر در یک شش ضلعی حلقه بسته است. آنها آرایه VCSEL عایق توپولوژیکی را بر اساس مدل کریستالی، با افزودن بهره و اتلاف قابل اشباع، بررسی کرده و سپس فقط VCSEL‌های مرتبط با رابط توپولوژیکی را پمپ کردند. این دستاورد به خاطر حل چالش‌هایی بنیادین بسیار ارزشمند بوده و مورد توجه قرار گرفت.

علاقمندان می‌توانند جزئیات این دستاورد را در مقاله زیر مطالعه نمایند.

Dikopoltsev et al.  
Science 373, 1514 (2021)  
DOI: 10.1126/science.abj2232



و اما دومین نامزدی که عنوان برترین دستاورد سال را نیز از آن خود کرده است، به بهره‌گیری از رویکردی که به کمک آن می‌توان همبستگی بین سامانه‌های ماکروسکوپیکی را کنترل کرد و به صورت نامحدود در هم‌تنیدگی بینشان را اندازه‌گیری کرد.

چیزی که آلبرت اینشتین با تردید از آن به عنوان "کنش شیحوار در فاصله" یاد کرده، یکی از مهمترین محرک‌های فناوری کوانتومی کنونی است. این کنش شیحوار یا درهم‌تنیدگی، پدیده‌ای را توصیف می‌کند که در آن اندازه‌گیری وضعیت یک ذره بر روی ذره دیگر اثرگذار است. ویژگی‌های اندازه‌گیری ذرات درهم‌تنیده به قدری با هم مرتبط هستند که از نظر آماری نمی‌توان این رابطه را تصادفی دانست و حتی بر اساس فیزیک کلاسیک آن را توجیه کرد.

اگرچه اثرات کوانتومی به راحتی در اجسام کوچک مشاهده می‌شود، اما مکانیک کوانتومی تنها به پدیده‌ها در مقیاس اتمی محدود نمی‌شود. در اصل، اجسام در هر اندازه باید مطابق با قوانین مکانیک کوانتومی رفتار کنند.

اما در مقیاس ماکرو، تشخیص اثرات کوانتومی به دلیل محدودیت‌های ابزارهای اندازه‌گیری نوین و تمایل اجسام بزرگ‌تر به تعامل با محیط‌های پر تنش (نویزی)، غیرممکن است.

درک درهم‌تنیدگی کوانتومی مفهومی قدری دشوار است چرا که بسیار غیرمعمول است. دو ذره را در دو انتهای کیهان تصور کنید. این ذرات می‌توانند از ویژگی‌های خاص خود برخوردار باشند البته تا زمانی که تحت اندازه‌گیری قرار را می‌توان به صورت قرمز یا آبی اندازه‌گیری کرد. هنگامی که یک ذره قرمز است، جفت درهم‌تنیده آن نیز قرمز خواهد بود. اما چیز عجیب این است که این خاصیت ذاتی ذرات نیست. در عوض، ذره اندازه‌گیری شده پس از اندازه‌گیری، تصمیم می‌گیرد قرمز باشد و به نحوی این انتخاب را در سراسر کیهان به دوست درهم‌تنیده‌اش منتقل می‌کند. این اعلامیه با سرعتی سریع‌تر از سرعت نور ارسال می‌شود! این موضوع توسط قضیه بل نشان داده شده است و با روش‌های مختلفی از نظر علمی تایید شده

است. برای پرکردن شکاف بین تجربه کلاسیک روزانه و انتظار ما مبنی بر اعتبار جهانی مکانیک کوانتومی، دانشمندان همواره به دنبال مشاهده پدیده‌های کوانتومی در سامانه‌های بزرگ‌تر هستند.

به تازگی، دو گروه تحقیقاتی شواهدی برای اثبات مستقیم اثرات کوانتومی ماکروسکوپی در دست دارند که توسط فیزیک کلاسیک قابل توصیف نیست. در رویکرد اول، همبستگی‌های مورد نیاز برای تأیید درهم‌تنیدگی بین اجسام مکانیکی مجزا بزرگ مقیاس را ایجاد و آن را اندازه‌گیری کردند.

در مقاله دیگر، محققان دانشگاه آلتو فنلاند سامانه مشابهی را توسعه دادند که در آن توانستند اندازه‌گیری‌های کوانتومی را انجام دهند که به نظر می‌رسید با اصل عدم قطعیت هایزنبرگ در تضاد باشد.

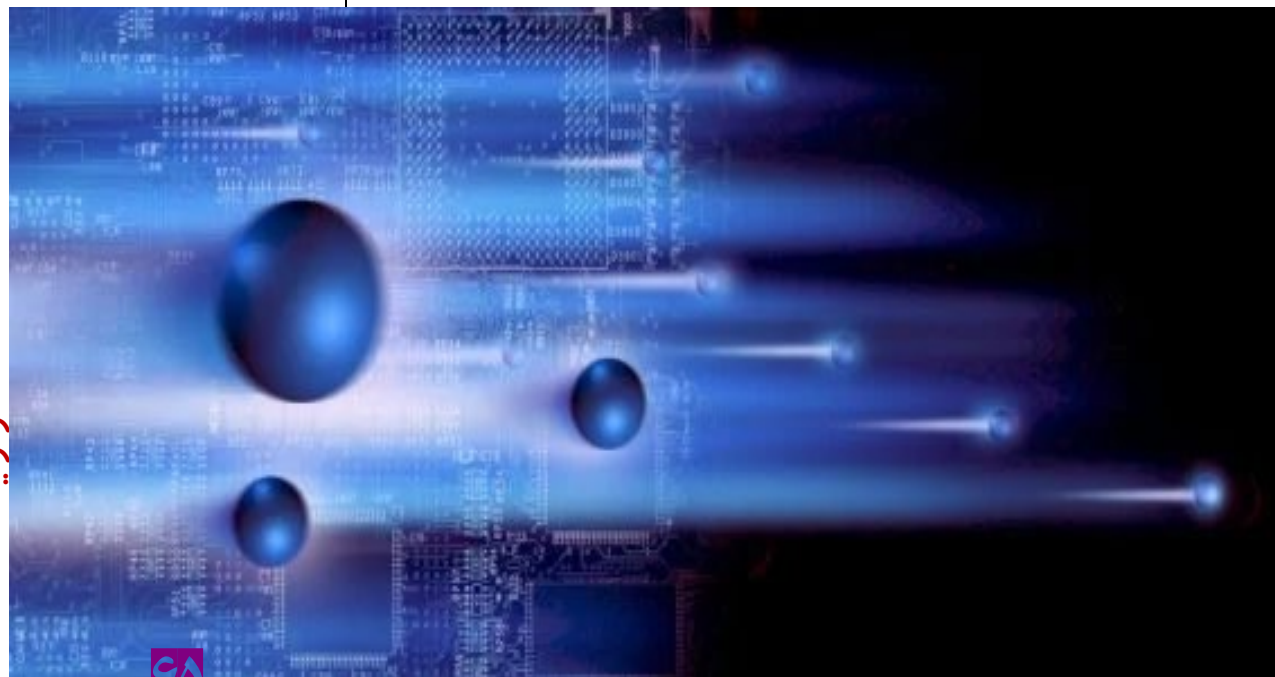
در هر دو مجموعه آزمایش، از یک جفت غشای سر طبل در مقیاس میکرومتر بهره گرفته شده که به طور تقریبی در هماهنگی کامل با هم نوسان می‌کنند. این مقیاس در مقایسه با سامانه‌های

اهمی که اغلب اثرات کوانتومی در آنها مشاهده می‌شود، ابعاد بزرگی محسوب می‌شود. علاوه بر بزرگ‌کردن قلمرو مشاهده‌شده نظریه کوانتومی، این اثرات - و توانایی دستکاری و تشخیص آنها - همچنین می‌تواند به طراحی‌های جدیدی برای گیت‌های منطقی و رویکردهای اندازه‌گیری پیشرفته منجر شود.

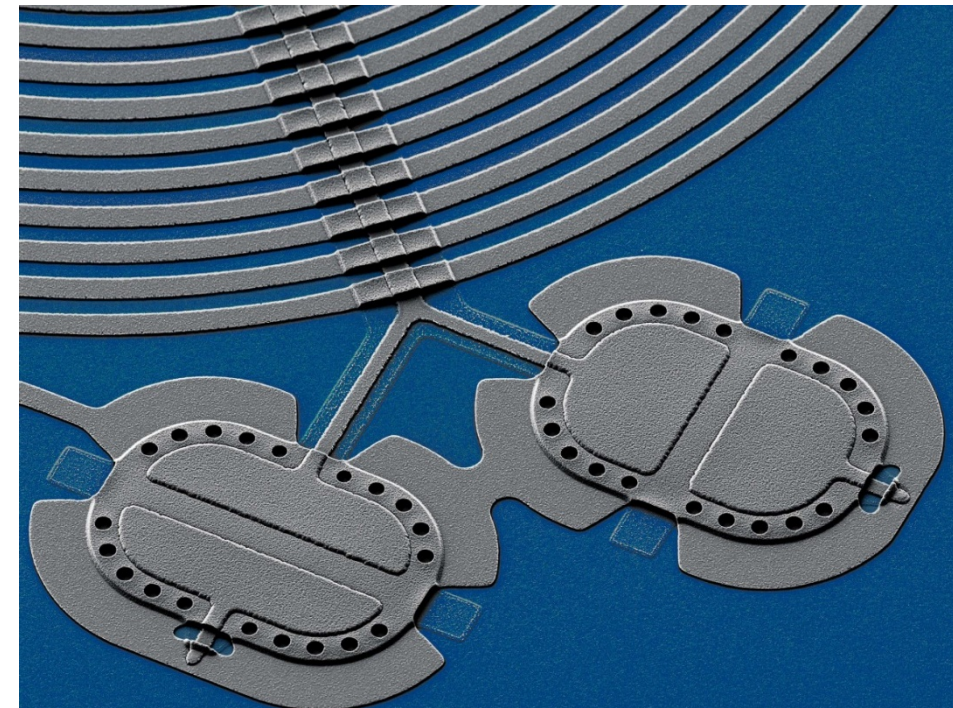
اثرات کوانتومی به راحتی در اتم‌ها و ذرات زیراتمی قابل مشاهده است. برای مثال، اتم‌های برانگیخته می‌توانند با گسیل دو فوتون در عرض نانوثانیه از یکدیگر تجزیه شوند. هنگامی که آن فوتون‌ها در جهت مخالف گسیل می‌شوند، بقای تکانه زاویه‌ای مستلزم این است که قطبش‌های آنها همبستگی داشته باشد. اطلاع از قطبش یکی اطلاعات انکارناپذیری در مورد قطبش دیگری ارائه می‌دهد و این یعنی دو فوتون درهم‌تنیده شده‌اند!

البته راهبردهای دیگری را می‌توان برای بررسی درهم‌تنیدگی ذرات اتمی از نظر فیزیکی دور در پیش گرفت. نگه داشتن جفت یون‌ها در تله‌ها و برانگیختن آنها به حالتی که از آن فوتون‌های

سامانه مجازی گروه آلتو ابزاری است که می‌توان آن را به عنوان یک شیء مکانیک کوانتومی بدون هر گونه زیرسامانه‌ای در نظر گرفت. این رویکرد مسیر اندازه‌گیری نیروهای کلاسیک بسیار ضعیفی که بر روی سامانه وارد می‌شود، را هموار می‌کند، در حالی که محدودیت‌های اندازه‌گیری که معمولاً توسط مکانیک کوانتومی را دور می‌زند. این روش اندازه‌گیری می‌تواند برای توسعه حسگرهایی با قابلیت‌هایی فراتر از هم‌تایان کلاسیکیه کار گرفته شود.







Clerk یکی از محققان فعال در این زمینه می‌گوید: "این اولین آزمایشی است که این نوع فیزیک را تنها با استفاده از درجات مکانیکی آزادی محقق می‌کند."

قطبی مخالف ساطع می‌کنند، باعث می‌شود یون‌ها در نهایت در دو حالت مختلف جای گیرند. اگر دو فوتون به طور همزمان شناسایی شوند، اندازه‌گیری نور ساطع شده، حالت انرژی یکی از یون‌ها را مشخص خواهد کرد که باید مخالف حالت یون دیگر است. اما در مورد یک نوسانگر مکانیکی بسیار بزرگتر، یک نوسانگر با تریلیون‌ها اتم روال به چه ترتیبی خواهد بود؟ آزمایش‌هایی برای بررسی این اثر صورت گرفته است که در آنها از غشاهای ارتعاشی در مقیاس میکرونی استفاده شده است که به عنوان بخشی از کاواک‌های مجزا ساخته می‌شوند و توسط تشعشعات مایکروویو و فرکانس‌های نوری به حرکت در می‌آیند که تا پیش از این هم این سازه‌ها شواهدی از درهم‌تنیدگی از خود نشان داده‌اند. فوتون‌ها از تشدیدگرها پراکنده شده و توسط آشکارسازها ثبت می‌شوند. اگر ارتعاشات همبستگی کامل داشته باشند، با یکدیگر تداخل می‌کنند. اما برخلاف دستاوردهای، در آن آزمایش‌ها نتایج حاصل یا غیر قطعی بودند یا

بر استنباط‌های پیچیده و حذف موقت نویز از تقویت‌کننده‌های مورد استفاده به عنوان بخشی از بازخوانی تکیه داشتند. تولید قطعی و تأیید مستقیم درهم‌تنیدگی در سامانه‌ای که بسیار بزرگتر از مقیاس اتمی است، بدون تکیه بر استنتاج‌های پیچیده، بیشتر به یک بازی می‌ماند. کاتلر، با همکاری جان توفل و سایر همکاران در NIST، دو غشای مستطیلی سرطبی آلومینیومی به طول ۱۰ میکرومتر ساخته است که از طریق یک کاواک تشدیدی به هم متصل شده‌اند. هر غشا صفحه‌ای در یک خازن ارتعاشی است که به یک مدار AC فرکانس مایکروویو متصل شده است. غشاهای درام آلومینیومی معلق بالای یک بستر یاقوت کبود در جهتی عمود بر آن می‌لرزند. هر غشاء صفحه بالایی یک خازن را تشکیل می‌دهد، در حالی که صفحه پایین به زیرلایه متصل می‌شود. یک سلف مارپیچی خازن‌ها را به هم وصل می‌کند تا یک کاواک مایکروویو را تشکیل دهد.

فشار تابش پالس‌های مایکروویو که به کاواک برخورد می‌کنند، نوسانات دو غشا را به سمت تشکیل حالت درهم تنیده سوق می‌دهد. دو پالس مایکروویو ورودی دستگاه‌ها را خنک کرده و آنها را برای انجام نوسانات هماهنگ هدایت می‌کند. پالس‌ها با دو فرکانس مختلف تولید می‌شوند که به طور جدایی‌ناپذیری غشاهای را به هم مرتبط می‌کنند. اگر غشاهای به طور مستقل به پالس‌ها پاسخ می‌دادند، می‌بایست یکی گرم می‌شد و دیگری با داپلر سرد می‌شد. اما نتیجه متفاوت بود! به طوری که برهمکنش یک غشاء با فوتون‌های تولید شده به صورت نوسان غشاء، حرکت درهم‌تنیده‌ای را ایجاد کرد. این حرکت شبیه حرکت دو آونگی است که با دامنه برابر و سرعت مخالف در حال نوسان هستند. هنگامی که پالس مایکروویو دیگری روی غشاهای نوسانی تابیده شد، نور منعکس شده به صورت داپلر جابجا شد که حاوی اطلاعاتی در مورد موقعیت و تکانه هر غشا بود. با تقویت سیگنال بازخوانی بلافاصله پس از خروج از دستگاه، محققان دریافتند که سیگنال اندازه‌گیری شده می‌تواند به وضوح از نویز متمایز شود. جای تعجب نیست که یک اندازه‌گیری واحد از نوسانات پالس محور هیچ ارتباط واضحی بین دو

غشا نشان نداد. اما با تکرار آزمایش ۱۰۰۰۰ بار و ترسیم نمودار تکامل حرکات غشاهای، محققان دریافتند که موقعیت‌های آنی، یکدیگر را با دقتی فراتر از آستانه مجاز فیزیک کلاسیک دنبال می‌کنند. آن همبستگی کامل، که در شکل زیر بخش b ترسیم شده است، نشان‌دهی از درهم‌تنیدگی کوانتومی است و نشان می‌دهد که این نوع سامانه‌های مکانیکی بزرگ را می‌توان به‌طور کنترل‌شده در هم پیچیده و با دقت کافی اندازه‌گیری کرد و به این ترتیب به صورت مستقیم درهم‌تنیدگی را مشاهده کرد. محققان می‌توانند با در نظر گرفتن غشاهای به عنوان یک وجود مجازی واحد، سامانه‌های درهم‌تنیده را بدون از بین بردن حالتشان مشاهده کنند. مشاهده نوسانگر مجازی منفرد امکان اندازه‌گیری کامل موقعیت آن را فراهم می‌کند. البته این در صورتی است که بتوان از عدم اختلال سامانه یا از بین رفتن درهم‌تنیدگی، در عملکرد برگشت کوانتومی اطمینان حاصل کرد. در مقایسه با دستگاه‌های اتمی، بستر غشای ارتعاشی را می‌توان به راحتی تولید و دستکاری کرد. ابزاری که برای کشف محدودیت‌های پدیده‌های کوانتومی و ایجاد دستگاه‌های مفید در ابعاد بزرگ ماکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای کسب اطلاعات بیشتر می‌توانید به مراجع زیر مراجعه نمایید:  
S. Kotler et al. *Science*, 372, 622 (2021).  
<https://doi.org/10.1126/science.abf2998>  
L. Mercier de Lépinay et al., *Science* 372, 625 (2021).  
<https://doi.org/10.1126/science.abf5389>

